



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

CARINA FERREIRA BARROS NOGUEIRA

**DIRETRIZES DE PROJETO PARA A REDUÇÃO DE PERDAS
NA PRODUÇÃO EM MASSA DE PAINÉIS DE VEDAÇÃO
PRÉ-FABRICADOS EM SISTEMAS DE CONSTRUÇÃO A
SECO**

CARINA FERREIRA BARROS NOGUEIRA

**DIRETRIZES DE PROJETO PARA A REDUÇÃO DE PERDAS
NA PRODUÇÃO EM MASSA DE PAINÉIS DE VEDAÇÃO
PRÉ-FABRICADOS EM SISTEMAS DE CONSTRUÇÃO A
SECO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Edificações.

Orientadora: Profa. Dra. Fernanda Aranha Saffaro

Londrina
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Nogueira, Carina Ferreira Barros.

Diretrizes de projeto para a redução de perdas na produção em massa de painéis de vedação pré-fabricados em sistemas de construção a seco / Carina Ferreira Barros Nogueira. - Londrina, 2016.
140 f. : il.

Orientador: Fernanda Aranha Saffaro.

Dissertação (Mestrado em Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, 2016.

Inclui bibliografia.

1. Modularidade do Produto - Teses. 2. Industrialização - Teses. 3. Simplificação da produção - Teses. 4. Racionalização - Teses. I. Saffaro, Fernanda Aranha. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento. III. Título.

CARINA FERREIRA BARROS NOGUEIRA

**DIRETRIZES DE PROJETO PARA A REDUÇÃO DE PERDAS NA
PRODUÇÃO EM MASSA DE PAINÉIS DE VEDAÇÃO PRÉ-
FABRICADOS EM SISTEMAS DE CONSTRUÇÃO A SECO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Edificações.

Comissão Examinadora:

Prof. Dra. Fernanda Aranha Saffaro (Orientadora)
Universidade Estadual de Londrina

Prof. Dr. Sidnei Junior Guadanhim
Universidade Estadual de Londrina

Profa. Dra. Cecília Gravina da Rocha
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Londrina, 4 de março de 2016.

À minha mãe, pelo exemplo de força e dedicação, por todo amor e apoio incondicionais e por me mostrar a importância da educação na realização dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas inúmeras bênçãos e por sempre me dar força, tranquilidade e coragem para superar os desafios na minha vida.

Ao meu esposo, melhor amigo e companheiro, pela paciência e por estar sempre ao meu lado, me motivando, me tornando melhor, e os meus dias, mais felizes.

A todos os meus amigos e familiares que acompanharam mais essa etapa da minha vida, me apoiando e desejando o meu sucesso; especialmente ao meu irmão, mesmo à distância, pelas mais sensíveis demonstrações de carinho e apoio incondicionais.

À minha orientadora, profa. Fernanda Aranha Saffaro, pela paciência, senso crítico e, especialmente, a dedicação na orientação deste trabalho, que contribuíram para o meu amadurecimento profissional.

Ao prof. Sidnei Junior Guadanhim, pelo apoio e colaboração no estudo de caso, bem como pelas as críticas e diálogos que ajudaram no desenvolvimento desta dissertação.

À profa. Cecília Gravina da Rocha, pela disponibilidade e seriedade com que contribuiu para o aprimoramento deste trabalho.

À profa. Ercília Hitomi Hirota, pela oportunidade de participar do grupo de pesquisa ZEMCH Brasil.

Aos amigos do mestrado pelo convívio, partilha de conhecimentos e desafios.

À Universidade Estadual de Londrina e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, na figura de seus docentes e funcionários, pela oportunidade e manutenção deste curso.

A todos aqueles que, embora não citados, contribuíram para o meu amadurecimento e para a conclusão desse objetivo.

NOGUEIRA, Carina Ferreira Barros. **Diretrizes de projeto para a redução de perdas na produção em massa de painéis de vedação pré-fabricados em sistemas de construção a seco**. 2016. 140f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Construtivos e Desempenho de Edificações) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2016.

RESUMO

O setor da construção civil vem sendo instigado a apresentar soluções para diminuir o déficit habitacional de interesse social e melhorar a qualidade dessas edificações. O emprego de sistemas construtivos industrializados pré-fabricados é uma alternativa com potencial de sucesso para este propósito e para a aplicação da customização em massa. No entanto, a possibilidade de conferir certo grau de customização na aquisição do imóvel pode acarretar impactos negativos na produção, o que aumenta a necessidade de definir na fase de projeto do produto soluções que atendam à racionalização da produção. A modularidade do produto é um dos elementos chave das estratégias de customização em massa, a partir da concepção de módulos que possam ser combinados para produzir uma grande gama de produtos. A presente pesquisa tem como objetivo, propor diretrizes de projeto para reduzir perdas na produção de painéis de vedação pré-fabricados em sistemas industrializados de construção a seco, com foco na simplificação da produção de habitações de interesse social customizadas. A abordagem metodológica adotada para o desenvolvimento das diretrizes foi a pesquisa construtiva, tendo como estratégia, o estudo de caso. O estudo teve como objeto um projeto habitacional real no sistema LWF destinado a famílias de baixa renda, partindo da revisão bibliográfica, desenvolvida para compreender os conceitos de Arquitetura e Modularidade do produto. Com base nos resultados obtidos, foram propostas diretrizes de projeto para a simplificação do produto, fundamentadas nos princípios de Arquitetura e Modularidade do Produto. A modulação do produto mostrou-se uma estratégia eficiente para a padronização dos componentes e elementos construtivos e para a simplificação do processo de produção em massa de painéis de vedação vertical em sistemas de construção a seco.

Palavras-chave: Modularidade do Produto. Industrialização. Simplificação da produção. Racionalização.

NOGUEIRA, Carina Ferreira Barros. **Design guidelines for reducing waste in the mass production of prefabricated wall panels in dry building systems**. 2016. 140f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Construtivos e Desempenho de Edificações) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2016.

ABSTRACT

Managers of the construction sector are being urged to provide solutions to reduce the housing deficit in the low-income segment and to improve the quality of these buildings. The use of prefabricated industrialized building systems is a potentially successful alternative for this purpose and for the implementation of mass customization. However, the possibility of conferring some degree of customization in housing may have negative impacts on production, which increases the need to define early solutions in the product design phase that meet the rationalisation avoiding waste of high-value materials and low productivity of manpower. The product modularity is one of the key elements of mass customization strategies, by designing modules that can be combined to provide high product variety. The aim of this research is to propose design guidelines to reduce waste in the production of prefabricated wall panels in dry construction systems, focusing on simplifying the production of customized social housing. The methodological approach adopted for the development of the guidelines was design science research. The research strategy was the case study carried out on a real housing project in LWF system, aimed at low-income families, starting from the literature review to understand the concepts of Product Architecture and Modularity. Based on the results, the design guidelines applying the principles of Architecture and Modularity Product were proposed for the product simplification. The adoption of product modularity in house-building design proved to be an efficient approach for the standardization of the components and construction elements and for simplifying the mass production process of wall panels in dry building systems.

Keywords: Product Modularity. Product simplification. Industrialisation. Rationalisation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de modularidade do produto.	34
Figura 2 – Tipos de modularidade <i>slot</i>	35
Figura 3 - Passagem das instalações nos painéis no sistema LWF	48
Figura 4 - Ancoragem dos painéis de vedação no sistema LWF.....	52
Figura 5 - Configuração das placas de vedação nos painéis LWF	53
Figura 6 - Arranjos especiais de montantes nas interseções das paredes	56
Figura 7 - Ligações entre painéis de vedação no sistema LWF	56
Figura 8 - Estrutura dos vãos nos painéis com aberturas	57
Figura 9 - Dimensões comerciais e aplicações das placas de gesso acartonado no sistema LWF.....	60
Figura 10 - Dimensões comerciais e aplicações das placas cimentícias no sistema LWF.....	62
Figura 11 - Representação gráfica do delineamento da pesquisa.....	67
Figura 12 - Simbologia adotada para elaboração do mapofluxograma desenvolvido na pesquisa.	78
Figura 13 – <i>Layout</i> básico da habitação e opções de customização.....	80
Figura 14 – Configuração dos elementos modulares do produto	82
Figura 15 – Conexões entre os painéis	83
Figura 16 – Painéis e esquadrias modulados.....	84
Figura 17 – Definição modulação a partir da malha nas áreas internas da habitação	86
Figura 18 – Dimensões das paredes externas	87
Figura 19 - Configuração padrão das placas de revestimento nos módulos com aberturas.....	90
Figura 20 – Vista e detalhe da junta aparente entre as placas cimentícias e as aberturas dos painéis.....	91
Figura 21 – Ligações de canto e acabamento dos painéis	92
Figura 22 - Ajuste das dimensões dos componentes dos painéis.....	93
Figura 23 – Definição dos módulos a partir do <i>layout</i> do projeto do produto	98
Figura 24 – Tipos de interfaces entre os módulos dos painéis de vedação	100
Figura 25 – Previsão de interfaces entre os elementos modulares para customização.....	101
Figura 26 - Definição dos módulos com base nas alterações propostas.....	103
Figura 27 – Previsão de aberturas para customização dos elementos modulares	104
Figura 28 – Modulação das áreas internas da habitação com base nas alterações propostas.....	105

Figura 29 – Proposta de padronização das interfaces, com base nas alterações propostas	107
Figura 30 – Mapofluxograma do processo de produção dos painéis de vedação.....	114
Figura 31 – Estruturas padronizadas dos painéis de vedação com aberturas	121
Figura 32 – Proposta inicial de revestimento em placa cimentícia em painel de vedação com aberturas.....	122
Figura 33 – Fluxo do subprocesso de produção da proposta inicial de revestimento em placas cimentícias	123
Figura 34 - Proposta final de revestimento em placa cimentícia em painel de vedação com aberturas.....	124
Figura 35 – Fluxo do subprocesso de produção da proposta final de revestimento em placas cimentícias.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferenças entre a construção civil e a produção industrial para a modularidade do produto, descritas por Rocha, Formoso e Tzortzopoulos (2015)	39
Tabela 2 - Matriz de Combinações de Módulo de um produto de arquitetura hipotético.....	41
Tabela 3 - Matriz de Interações de Módulo de um produto de arquitetura hipotético	42
Tabela 4 - Variações de seção transversal dos perfis de madeira no sistema LWF	55
Tabela 5 - Dimensões comerciais e aplicações das placas OSB no sistema LWF.....	58
Tabela 6 – Protocolo para quantificação das perdas de material.....	73
Tabela 7 – Protocolo para registro e caracterização dos módulos extraídos do projeto do produto.....	76
Tabela 8 – Quantificação do consumo e das perdas de material.....	88
Tabela 9 - Quantificação do consumo e das perdas de material, com base nas alterações propostas.....	94
Tabela 10 – Resumo dos resultados da quantificação da perda de material.....	94
Tabela 11 – Aplicação da matriz de combinações de módulo	99
Tabela 12 - Aplicação da matriz de interações de módulo.....	101
Tabela 13 – Alteração dos módulos existentes para melhoria da modularidade do produto .	102
Tabela 14 - Aplicação da matriz de combinações de módulo, com base nas alterações propostas.....	106
Tabela 15 - Aplicação da matriz de interações de módulo, com base nas alterações propostas	108
Tabela 16 - Registro e caracterização dos módulos extraídos do projeto do produto, com base nas alterações propostas.....	110

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CES – Construção Energética Sustentável

EHIS – Empreendimento Habitacional de Interesse Social

GIP - Grau de Interdependência dos Processos

GPO - Grau de Padronização de Operações

HIS – Habitação de Interesse Social

LWF – *Light Wood Frame*

LSF - *Light Steel Frame*

MUI - Índice de Utilização do Módulo (do original *Module Use Index*)

NBR – Norma Brasileira

OSB – *Oriented Strand Board*

PEX - Polietileno reticulado

PMCMV - Programa Minha Casa Minha Vida

ZEMCH – *Zero Energy Mass Custom Home*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contexto da pesquisa.....	14
1.2	Problema de pesquisa.....	15
1.3	Questões de pesquisa.....	18
1.4	Objetivos da pesquisa.....	19
1.4.1	Objetivo Geral	19
1.4.2	Objetivos específicos.....	19
1.5	Delimitação da Pesquisa	19
1.6	Estruturação do Trabalho	19
2	MODULARIDADE DO PRODUTO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	21
2.1	Definição de componentes, elementos e sistema construtivo	21
2.2	Conceito de perda no processo produtivo	22
2.3	Conceitos relacionados a Módulo	24
2.4	Arquitetura e Modularidade do produto	27
2.4.1	Aplicação da Arquitetura do Produto no sistema de produção	30
2.4.2	Tipologias de Arquitetura do Produto	32
2.4.3	Customização em massa do produto	36
2.4.4	Modularidade do Produto na produção de habitações customizadas	38
2.5	Considerações Finais sobre o capítulo.....	42
3	O SISTEMA <i>LIGHT WOOD FRAME</i> (LWF)	44
3.1	Conceituação de industrialização e racionalização adotadas no trabalho	44
3.2	Sistema de construção a seco.....	46
3.2.1	Sistema Light Steel Frame e Sistema Light Wood Frame.....	46
3.3	Métodos construtivos utilizados nos sistemas de construção a seco	49
3.3.1	Método Stick	49
3.3.2	Método por Painéis.....	50
3.3.3	Construção Modular.....	50
3.4	Elementos de vedação (painéis) do sistema LWF	51
3.5	Componentes do sistema LWF.....	54
3.5.1	Perfis de Madeira.....	54
3.5.2	Placas OSB (Oriented Strand Board)	58
3.5.3	Placas de Gesso Acartonado.....	59
3.5.4	Placas Cimentícias.....	61
3.6	Considerações finais sobre o capítulo	63

4	MÉTODO DE PESQUISA	64
4.1	Abordagem e Estratégia de Pesquisa	64
4.2	Delineamento da Pesquisa	65
4.3	Variáveis e constructos	69
4.4	Fontes de evidências	72
4.4.1	Etapa de Compreensão	72
4.4.2	Etapa de Desenvolvimento	74
4.4.3	Etapa de Avaliação	77
5	RESULTADOS	79
5.1	Estudo de caso – Primeira fase	79
5.1.1	Definição da modulação para desenvolvimento do produto	81
5.1.2	Identificação e quantificação das perdas de material no desenvolvimento do projeto de uma HIS em LWF	88
5.1.3	Síntese conclusiva da primeira fase do estudo de caso	95
5.2	Estudo de caso – Segunda fase	96
5.2.1	Análise da Arquitetura e Modularidade do Produto	97
5.2.2	Caracterização e análise dos módulos propostos	109
5.2.3	Síntese conclusiva do estudo de caso principal	112
5.3	Avaliação das decisões de projeto do produto	112
5.3.1	Mapeamento do processo de produção dos painéis de vedação	113
5.3.2	Avaliação da complexidade dos subprocessos de produção	119
6	DIRETRIZES DE PROJETO DO PRODUTO	128
6.1	Proposta de diretrizes de projeto para a redução de perdas na produção em massa de painéis de vedação em sistemas de construção a seco	128
6.1.1	Diretrizes de projeto para a modulação dos painéis de vedação e simplificação do produto	130
6.1.2	Diretrizes de projeto para padronização dos componentes modulares dos painéis de vedação em sistemas de construção a seco	132
7	CONCLUSÕES	134
7.1	Sugestões para estudos futuros	135
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto da pesquisa

O desperdício tem sido reconhecido como um grande problema na construção civil e tem implicações importantes na eficiência da indústria e no impacto ambiental (FORMOSO *et al.*, 2002). Conforme Koskela (2000), as perdas são decorrentes da falta de planejamento. Nesse sentido, a eliminação ou minimização das atividades que não agregam valor ao produto dependem de uma ordenação adequada dos processos e da própria natureza da produção de bens e serviços (acidentes, defeitos e outras ações que geram atividades de fluxo). Embora a importância da fase de concepção do produto seja consenso no meio científico e técnico, a construção civil é caracterizada pela baixa integração entre as atividades de projeto e produção. Isso ocorre, principalmente porque muitas decisões projetuais são tomadas de forma independente e orientadas para definições acerca do produto, sem considerar as implicações no modo de produção adequado.

Nesse contexto, as etapas iniciais do desenvolvimento de empreendimentos, em especial de habitações de interesse social, ainda têm sido pouco valorizadas na busca de soluções de produto que atendam à racionalização da produção, evitando perdas e baixa produtividade da mão de obra. O acompanhamento dos indicadores de perdas permite identificar potenciais áreas de melhoria e as principais causas de ineficiência dos processos (FORMOSO *et al.*, 1996). Segundo Formoso *et al.* (1996), para reduzir as perdas na construção é preciso conhecer sua natureza e identificar suas principais causas. Falhas no projeto do produto constituem-se em uma das causas das perdas que se manifestam no sistema de produção. Assim, identificar e quantificar as perdas mostra-se uma forma de avaliar o desempenho do projeto do produto (FORMOSO *et al.*, 2002).

A adoção de sistemas construtivos industrializados e pré-fabricados minimiza improvisações em canteiro de obras, que podem acarretar prejuízos na produtividade, na qualidade, e no desempenho das construções. Além disso, o aumento da quantidade de etapas do processo de produção que são transferidas do canteiro para a fábrica possibilita a racionalização do processo (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012). Nesse sentido, a fase de concepção exerce papel determinante, tanto na qualidade do produto quanto do processo construtivo (FRANCO; AGOPYAN, 1994). Dessa fase dependem muitas medidas de racionalização da produção que trazem maior impacto no custo, na velocidade e na qualidade

dos empreendimentos (O'CONNOR; DAVIES, 1988). Assim, é necessário que sejam considerados nos projetos como será o processo de montagem da edificação. Ou seja, as etapas de projeto do produto devem ser desenvolvidas em acordo com as implicações construtivas durante o processo de produção.

Os sistemas de construção a seco, *Light Wood Frame* (LWF) e *Light Steel Frame* (LSF), revelam-se uma alternativa tecnológica com potencial para a racionalização do processo de construção, especialmente no caso de Empreendimentos de Habitações de Interesse Social (EHIS). Esses sistemas apresentam a possibilidade de redução significativa do prazo de execução, aspecto importante em EHIS, além de permitir a inserção das tubulações de instalações prediais (elétrica, água e esgoto) nos espaços livres formados entre as placas de vedação das paredes. Dessa forma, as atividades no canteiro podem ser reduzidas com a realização da inserção das instalações nos painéis durante o processo produtivo na fábrica. Este último benefício tem implicações, também, na redução da interdependência entre etapas do processo produtivo e do desperdício, uma vez que elimina a necessidade de quebra de paredes para o embutimento de ramais e para manutenção na fase de uso.

Nesta pesquisa, o sistema estudado é o LWF, uma vez que é adotado por empresas brasileiras que atuam na produção de EHIS e homologado pelo Ministério das Cidades para este fim. A principal característica do sistema LWF é o uso de uma estrutura de perfis leves de madeira maciça serrada, contraventada a partir de placas estruturais OSB (*Oriented Strand Board*), formando um sistema de painéis com rigidez, forma e sustentação à edificação. Sobre a placa OSB é fixado o acabamento nas faces internas e externas do painel. Este sistema é indicado tanto para a construção de edificações unifamiliares, como para construções multifamiliares de até cinco pavimentos (LPBRASIL, 2011).

1.2 Problema de pesquisa

O combate ao desperdício em sistemas construtivos industrializados é imperioso, tendo em vista o emprego de componentes de maior valor agregado e as expectativas depositadas nestes sistemas no sentido de solucionar problemas recorrentes de desperdícios ao empregar sistemas construtivos tradicionais. Este combate deve ser buscado com mais ênfase em empreendimentos de habitações de interesse social (EHIS), uma vez que a necessidade de redução de custos neste tipo de empreendimento é um fator de grande importância.

A construção a seco, por ser industrializada, tem potencial para alcançar níveis mínimos de perdas no seu processo produtivo. Contudo, a racionalização depende da elaboração adequada do projeto do produto e do seu processo de produção. Esses projetos devem possibilitar a utilização dos componentes e suas interfaces de forma a garantir o melhor aproveitamento, uma vez que se trata de componentes de alto valor agregado.

A definição do produto envolve um grande esforço na definição dos espaços internos delimitados pelos elementos verticais de fechamento (painéis de vedação), em que a modulação dos painéis de vedação está relacionada à modulação e à área dos espaços internos da edificação. Uma vez que o subsistema de vedação vertical corresponde à maior parte dos elementos e componentes construtivos e à maior área da edificação, as decisões voltadas à definição desses elementos têm grande importância no planejamento do processo de desenvolvimento do produto, desde sua concepção até sua produção em fábrica e posterior montagem no canteiro de obras.

Além disso, decisões importantes no processo são referentes à seleção da quantidade e dos tipos de etapas que serão realizadas para produzir um produto (FIXSON, 2005). A complexidade de um produto ou processo aumenta os custos de produção (KOSKELA, 2000). Assim, uma grande variedade de componentes pode prejudicar a racionalização do processo construtivo. Dessa forma, na definição dos painéis (paredes e lajes) do sistema, deve haver a preocupação em reduzir a perda de componentes, como as placas OSB e de acabamento (cimentícia e gesso acartonado), além de manter uma baixa variedade de painéis a serem produzidos em fábrica, especialmente quando considerada a produção em massa.

Nesse contexto, a simplificação busca a redução do número de componentes em um produto, ou a redução do número de etapas e articulações em um fluxo de materiais ou de informações, de modo a reduzir as atividades que não agregam valor ao produto (KOSKELA, 2000). Dessa forma, a simplificação do processo produtivo depende de um produto simplificado, a partir da simplificação de suas partes, para que resulte em rendimentos mais altos e custos mais baixos de produção (FIXSON, 2005). A simplificação está relacionada também à pré-fabricação, uma vez que esta depende da padronização de partes, materiais, equipamentos e ferramentas.

Outro aspecto relevante no desenvolvimento do produto em EHS consiste em conferir certo grau de customização na aquisição do imóvel e possibilidades de alterações futuras para atender as necessidades do usuário. A customização em massa consiste em alcançar uma variedade de produtos e volume elevados, oferecendo produtos que satisfaçam as exigências específicas de diferentes clientes a partir de processos flexíveis e estruturas

organizacionais (PINE, 1993). Além disso, demanda a criação de novos produtos em menores intervalos de tempo (FIXSON, 2005).

No entanto, a possibilidade de conferir certo grau de customização na aquisição do imóvel pode acarretar impactos negativos na produção. Especialmente quando se trata de sistemas construtivos industrializados e quando o número de habitações a serem produzidas é elevado, parte dos ganhos pode ser advinda da produção em massa. A conciliação de propósitos, em princípio, antagônicos (customização e a produção em massa), tem sido investigada em trabalhos científicos relacionados ao desenvolvimento dos produtos na construção civil. Apesar deste cenário descrito, não foi possível encontrar na literatura trabalhos de cunho científico que explorem diretrizes de projeto voltadas à redução de perdas, como as decorrentes de incompatibilidades dimensionais, ao utilizar o sistema construtivo LSF e LWF em EHIS e que contemplem os princípios da customização em massa.

Tendo em vista a limitação de custos em EHIS, exigindo a redução de perdas e a simplificação da produção, os conceitos relativos à Arquitetura e Modularidade do Produto podem ser uma estratégia favorável para o desenvolvimento de projetos de HIS padronizados e, ainda assim, customizáveis. Segundo Rocha, Formoso e Tzortzopoulos (2015), a modularidade do produto (*product modularity* ou *modular architecture*¹) é um dos elementos chave das estratégias de customização em massa. A aplicação desses conceitos parte do princípio da utilização de um conjunto de subconjuntos de componentes (módulos) intercambiáveis que possibilitem a criação de uma ampla variedade de produtos (habitações).

Um dos focos de investigação necessários na customização em massa e que deve ser solucionado na etapa de projeto do produto é justamente a redução dos impactos negativos da na etapa de produção. Dessa forma, a adoção de um produto modular pode reduzir as incertezas causadas na produção decorrentes da flexibilização necessária para a customização. Em grandes empreendimentos, a modularidade do produto pode determinar grau de customização das habitações e o nível de eficiência da produção (HOFMAN; VOORDIJK; HALMAN, 2009² apud ROCHA; FORMOSO; TZORTZOPOULOS, 2015).

Assim, no desenvolvimento de produtos em sistemas construtivos industrializados é preciso que os componentes passem por uma padronização e por uma redução da variedade de tipos. Além disso, segundo Fixson (2005), a reutilização de produtos ou partes potencializa

¹ Os termos *product modularity* e *modular architecture* são entendidos nesse trabalho, conforme tradução, como modularidade do produto ou arquitetura modular, respectivamente.

² HOFMAN, E.; VOORDIJK, H.; HALMAN, J. Matching supply networks to a modular product architecture. Building Research and Information, 2009. 31–42.

efeitos de economia de escala decorrentes que podem reduzir o custo unitário do produto, uma vez que permite a distribuição dos custos fixos em volumes maiores de produtos (FIXSON, 2005). Portanto, a flexibilidade de um produto com projeto modular favorece a customização rápida e econômica de um produto.

A aplicação destes conceitos pode trazer contribuições importantes para o segmento de EHIS que utilizam sistemas construtivos industrializados, tendo em vista o potencial para permitir a customização em larga escala, minimizando os impactos na linha de produção, com repercussão na redução de custos. Contudo, apesar dos potenciais benefícios da modularidade do produto, ainda existem dificuldades na disseminação desse conceito no setor de construção de habitações. Segundo Rocha, Formoso e Tzortozopoulos (2015), as conceituações existentes de modularidade do produto não consideram as peculiaridades da construção civil. Dessa forma, a utilidade dos conceitos e ferramentas propostos pelos autores deve ser investigada no desenvolvimento de novos projetos de construção de habitações.

1.3 Questões de pesquisa

A questão principal a ser respondida é:

Como reduzir perdas na produção de painéis pré-fabricadas em sistemas industrializados de construção a seco, contemplando os princípios da customização em massa, a partir do projeto do produto?

A questão principal demanda a formulação de duas questões secundárias:

- (a) Como reduzir as variações nas configurações (dimensões, aberturas, conexões) dos painéis de vedação pré-fabricados em sistemas de construção a seco, a partir do projeto do produto?
- (b) Como simplificar a produção (reduzir variações dos componentes e padronizar elementos construtivos) dos painéis de vedação pré-fabricados em sistemas de construção a seco, a partir do projeto do produto?

1.4 Objetivos da pesquisa

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo dessa pesquisa é apresentar diretrizes de projeto para reduzir perdas na produção de painéis de vedação pré-fabricados em sistemas industrializados de construção a seco, que contemplem os princípios da customização em massa.

1.4.2 Objetivos específicos

- (a) Propor diretrizes de projeto para a composição de painéis de vedação em sistemas industrializados de construção a seco, fundamentadas nos princípios da Arquitetura e Modularidade do Produto;
- (b) Propor diretrizes de projeto para a simplificação do produto a partir da definição de configurações padronizadas de elementos (painéis), de modo a reduzir as variações e melhorar o aproveitamento dos elementos e componentes (placas).

1.5 Delimitação da Pesquisa

O presente trabalho se restringe a disponibilizar diretrizes para o desenvolvimento do projeto do produto com foco na redução de perdas na produção e racionalização do processo construtivo. Esta estratégia é direcionada ao desenvolvimento de EHIS em sistemas de construção a seco que contemplem os conceitos de customização em massa, podendo ser aplicadas em outros tipos de edificações painelizadas em sistemas construtivos similares.

1.6 Estruturação do Trabalho

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução geral ao assunto a partir da problemática analisada, além das questões de pesquisa propostas, os objetivos principais e específicos do trabalho e as suas delimitações.

O capítulo dois apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais conceitos de modulação, módulo, modularidade do produto e plataforma. O mesmo capítulo aborda ainda

a conceituação de Modularidade do Produto para a produção de habitações e o uso de indicadores para analisar a Arquitetura de Produto em edifícios habitacionais.

O capítulo três apresenta uma revisão bibliográfica sobre o sistema construtivo LWF relacionado à industrialização e racionalização construtiva. Posteriormente, são apresentados os métodos construtivos, as características funcionais, os elementos e os componentes construtivos desse sistema, considerados de maior enfoque nesta pesquisa.

O capítulo quatro apresenta o método de pesquisa, sendo iniciado com a descrição da estratégia e do delineamento da pesquisa. Posteriormente, são descritas as variáveis e constructos que orientaram o processo de pesquisa e a avaliação das diretrizes propostas, as etapas realizadas com base na pesquisa construtiva e as ferramentas adotadas para coleta e análise das variáveis e constructos.

O capítulo cinco apresenta os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do estudo de caso. A primeira fase do estudo, de caráter exploratório, teve como objetivo identificar e quantificar as perdas de material durante o processo de desenvolvimento do produto. A segunda fase do estudo teve como objetivo avaliar a modularidade do produto e analisar as soluções de projeto adotadas para simplificação do produto e da produção.

O capítulo seis apresenta a discussão dos resultados e as diretrizes propostas para a redução de perdas na produção em massa de painéis de vedação vertical pré-fabricados em sistemas de construção a seco, contemplando os princípios da customização em massa, e consolidação dos resultados do estudo desenvolvido.

Por fim, o último capítulo apresenta as conclusões finais do trabalho e sugestões para futuros estudos relacionadas à temática abordada neste trabalho.

2 MODULARIDADE DO PRODUTO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Este capítulo apresenta conceitos básicos relacionados à arquitetura do produto, customização em massa e sua aplicação na elaboração de projetos de habitações. É dada ênfase à discussão dos conceitos de módulo e modularidade do produto. São, também, apresentados indicadores para avaliar o grau de contemplação aos princípios de arquitetura modular no desenvolvimento de habitações.

Tais conceitos serão tratados neste capítulo, tendo em vista sua importância para projetos de habitações que empreguem sistemas construtivos industrializados, tal como o objeto investigado nesta pesquisa. Inicialmente serão esclarecidos alguns termos empregados ao longo deste e do próximo capítulo.

2.1 Definição de componentes, elementos e sistema construtivo

Os significados dos termos “componente”, “elemento” e “sistema construtivo” podem ser entendidos de diferentes maneiras. Assim, mostra-se importante estabelecer as respectivas definições, de modo que possibilite uma comunicação eficiente entre os diversos interlocutores. No presente trabalho, foram adotadas definições particularizadas para a indústria da construção civil, que permitam o entendimento desses conceitos, no contexto da produção de habitações em sistemas construtivos industrializados.

O termo “componente” será utilizado para expressar unidades distintas de determinado elemento da edificação. Conforme definição da ABNT (2013), essas unidades são destinadas a cumprir funções específicas em um produto e apresentam forma definida e medidas especificadas nas três dimensões (comprimento, largura e espessura). No contexto da construção civil, o componente corresponde a um objeto que se integra diretamente na constituição da construção (exemplos: perfis de madeira, placas de gesso acartonado, telhas), cuja função é executada a partir de sua montagem em conjunto com outros componentes iguais, semelhantes ou diferentes (DUARTE, 1982).

O termo “elemento” será empregado para indicar a parte de um sistema composto por um conjunto de componentes e com funções específicas (ABNT, 2013). No contexto da construção civil, os elementos construtivos são as partes que tem a função de permitir a

utilização dos espaços da edificação (exemplo: parede, painel de vedação, treliça de cobertura).

Um “sistema construtivo” é composto por um conjunto de elementos e componentes funcionais e representa a maior parte funcional do edifício (ABNT, 2013). “Subsistema construtivo” é outro termo também encontrado na literatura, não mencionado por ABNT (2013), que corresponde a um conjunto de elementos de parte da edificação com funções específicas (vedação, cobertura, instalações, fundação), enquanto o sistema construtivo se refere à edificação como um todo (conjunto de subsistemas).

2.2 Conceito de perda no processo produtivo

Sob o enfoque da Construção Enxuta, o conceito de perda assume um caráter mais amplo, abrangendo não apenas o desperdício de materiais tratados nos trabalhos de Skoyles (1974), Soibelman (1993), mas a presença de atividades que não agregam valor sob o enfoque do cliente. Neste sentido, Ohno (1997) apresenta uma lista de sete perdas representativas do contexto da manufatura. Essas perdas correspondem a: superprodução, correção, transporte de material, processamento, estoque, espera e movimentação (OHNO, 1997). Posteriormente, pesquisas desenvolvidas por Koskela (2004) e Sommer (2012) ampliaram a relação de perdas para o contexto da construção civil, incluindo a perda por *making-do*³. Recentemente, Formoso *et al.* (2015) retomaram pesquisas com o propósito de entendimento do conceito de perdas na construção civil, os autores apresentam um mapa conceitual com o objetivo de contribuir para um maior entendimento de perdas neste contexto. Neste mapa conceitual são demonstradas as relações de causa e efeito das perdas manifestadas na etapa de produção. Segundo os autores, estas relações explicam como os efeitos de uma perda influenciam a outra, justificando a alta incidência de perdas no setor.

Ainda no que se refere ao entendimento do conceito de perda, Koskela (2000) considera que todas as atividades consomem tempo e geram custos, mas somente as atividades de transformação da matéria-prima no produto requerido pelo cliente agregam valor. Outras etapas do processo de produção, que abrangem as atividades de retrabalho, de transporte, de inspeção e a espera (estoques de matéria prima, produtos em processo e

³ a perda por *making-do* é bastante frequente na construção civil e decorre da disponibilidade inadequada dos recursos ao iniciar uma tarefa. Esse tipo de perda pode resultar em acidentes de trabalho, baixa produtividade, perda de material, ociosidade de equipamentos, baixa motivação da mão de obra e mau uso do capital aplicado (SOMMER, 2010).

produtos prontos) consomem tempo e recursos, mas não atendem aos requisitos do cliente, sendo definidas como perda. Este entendimento amplo acerca do conceito de perda permitiu que o referido autor definisse ações gerenciais que permitem atuar no sentido de reduzir perdas. Koskela propõe cinco princípios direcionados a este propósito: (a) redução do lead time⁴; (b) redução da variabilidade; (c) simplificação; (d) aumento da flexibilidade; e (e) aumento da transparência.

No que tange às medidas para redução de perdas, destaca-se que embora os estudos empíricos que embasaram a elaboração do mapa conceitual apresentado por Formoso *et al.* (2015) tenham sido focados na etapa de produção, os resultados permitiram identificar que a etapa de projeto do produto apresenta relações com as perdas identificadas na etapa de produção. Tendo em vista o fato que a presente pesquisa está voltada à redução de perdas favorecidas pelo projeto de EHIS, empregando um sistema construtivo industrializado, será explorada a redução de perdas decorrentes da simplificação do produto e de seu processo de produção.

De acordo com Koskela (2000), a complexidade de um produto ou processo aumenta os custos globais acima da soma dos custos das partes individuais do produto ou de cada etapa de produção. Além disso, sistemas complexos de produção são menos confiáveis do que os processos mais simples. Dessa forma, a simplificação pode ser entendida como a redução do número de componentes em um produto, ou a redução do número de etapas e articulações em um fluxo de materiais ou de informações (KOSKELA, 2000). A simplificação está relacionada também à pré-fabricação, uma vez que esta depende da padronização de partes, materiais, equipamentos e ferramentas, além de reduzir o número de atividades no canteiro.

Para aumentar a simplificação de um produto ou processo, Koskela (2000) sugere a redução das atividades que não agregam valor e a reconfiguração das atividades que agregam valor a partir de abordagens práticas, tais como: (a) diminuir os fluxos por meio da consolidação das atividades; (b) reduzir o número de componentes do produto, a partir de modificações de projeto ou da pré-fabricação; (c) padronizar componentes, materiais, ferramentas; (d) dissociar as articulações de um processo; (e) minimizar a quantidade de informação necessária para controle de um processo.

A simplificação envolve a diminuição das interdependências de processos e de fluxos de processos dos sistemas de produção (SAN MARTIN, 1999). O estudo desenvolvido por

⁴ O *lead time* corresponde ao tempo requerido para um peça ou material completar o fluxo de produção (KOSKELA, 2000). É resultante da soma dos tempos de processamento, inspeção, espera e movimentação da produção.

Santos (1999) mostrou que quando existe uma ligação rígida entre dois ou mais processos, é maior a chance de ocorrer perturbações no local de trabalho.

O conceito de transparência está relacionado à facilidade de identificação e compreensão dos processos do sistema de produção pelos agentes envolvidos (KOSKELA, 2000). Uma das abordagens para facilitar o entendimento do processo é torná-lo diretamente observável, a partir de um *layout* e iluminação apropriados, bem como o planejamento adequado do fluxo das estações de trabalho (SANTOS, 1999). Isso permite a observação do processo a partir do máximo de perspectivas possíveis. Dessa forma, os operários são capazes de entender por que partes da estação de trabalho anterior estão atrasadas, ou porque a próxima estação de trabalho está parada (SANTOS, 1999).

Assim, a simplificação, isto é a redução do número de componentes de um produto ou passos de um processo e das interdependências, aumenta a transparência, uma vez que permite a separação de processos no tempo e no espaço (SANTOS, 1999). Segundo Santos (1999), essa separação também reduz interrupções nos fluxos dos processos e contribui para a redução da complexidade, facilitando a coordenação dos processos dentro de um sistema de produção. Conforme o autor, a redução do número de partes e passos e das interdependências pode ser alcançada a partir de melhorias e inovação em projeto, métodos de produção ou mudanças no cronograma. Nesse sentido, a adoção de um projeto modular no desenvolvimento do produto favorece a flexibilização dos processos construtivos e a possibilidade de padronização e intercambiabilidade. Desse modo, o emprego do módulo possibilita aumentar a simplificação do produto e do processo produtivo, reduzindo o número de partes e passos.

2.3 Conceitos relacionados a Módulo

A definição do módulo é princípio fundamental para possibilitar a coordenação dos componentes e elementos de um sistema construtivo. As dimensões dos elementos e componentes modulares⁵ são definidas por intermédio de medidas modulares organizadas

⁵ Componentes e elementos modulares são aqueles cujas medidas de coordenação são modulares (ABNT, 2010). As medidas nominais de fabricação desses componentes e elementos (medidas modulares) são determinadas a partir da subtração das medidas do ajuste de coordenação (tolerâncias de fabricação, deformações térmicas, estruturais e por umidade, operações de instalação, materiais de união com elementos ou componentes adjacentes).

através de um reticulado de referência. Os conceitos discutidos a seguir esclarecem as definições usuais para módulo e arquitetura modular no contexto da construção civil.

A coordenação dimensional é a inter-relação de medidas de elementos e componentes construtivos para projeto, fabricação e montagem das edificações que os incorporam (ABNT, 2010). Segundo Duarte (1982), a coordenação dimensional corresponde à relação entre as dimensões dos diversos componentes, a partir de uma lei matemática de aditividade e multiplicidade.

Quando aplicados ao projeto e à construção, esses princípios criam condições para utilização de produtos industrializados e métodos racionalizados de produção (DUARTE, 1982). Em projetos de produto coordenados dimensionalmente, a medida modular adotada pode ser escolhida conforme conveniência. Esta coordenação de dimensões pode ocorrer mediante o emprego de componentes múltiplos de módulos diferentes. Isso pode demandar componentes cujas medidas não são encontradas facilmente no mercado da construção civil. No entanto, quando os componentes são múltiplos de uma medida modular padrão, a elaboração do projeto e a intercambiabilidade são facilitados.

O módulo é a unidade de medida fundamental na coordenação modular, determinado módulo básico (100 milímetros), e define o espaço de coordenação modular de qualquer elemento ou componente (ABNT, 2010). Assim, a coordenação modular corresponde à aplicação da coordenação dimensional mediante o emprego do módulo básico⁶ ou de um multimódulo⁷ (ABNT, 2010).

No contexto da construção civil, a coordenação modular estabelece uma gama de dimensões múltiplas e inteiras de uma dimensão básica para uso comum e simultâneo no dimensionamento de elementos para a constituição de um edifício (DUARTE, 1982). A medida modular é igual a um módulo ou a um multimódulo de um componente, vão ou distância entre partes da construção. Essa medida considera o componente e a folga perimetral necessária para absorver as tolerâncias de fabricação e de montagem na obra, conforme as técnicas construtivas aplicadas e as normas vigentes (GREVEN; BALDAUF, 2007).

Conforme definido anteriormente, a coordenação dimensional pode ser baseada em medidas modulares diferentes, enquanto a coordenação modular, através da adoção do módulo básico (100milímetros), busca compatibilizar componentes produzidos por diversas indústrias. Uma edificação coordenada modularmente é definida pela repetição de uma

⁶O Módulo básico corresponde à menor unidade de medida linear da coordenação modular, com valor normalizado de 100 milímetros, e é representado por “M” (ABNT, 2010).

⁷ O multimódulo corresponde a um múltiplo inteiro do módulo básico (ABNT, 2010), e é representado por “nM”, em que “n” é um número positivo inteiro e “M” é o módulo (GREVEN; BALDAUF, 2007).

medida igual ou proporcional ao módulo. Assim, uma edificação pode ser constituída por meio da repetição de componentes e elementos sem ser coordenada modularmente, mas coordenada dimensionalmente.

Segundo a Agência Europeia para a Produtividade (AEP⁸, 1962 apud GREVEN; BALDAUF, 2007), o módulo desempenha funções essenciais de denominador comum de todas as medidas ordenadas e de acréscimo unitário de toda e qualquer dimensão modular, a fim de que a soma ou a diferença de duas dimensões modulares também seja modular.

O termo módulo é usado de muitas formas como referência para o dimensionamento de uma medida básica, conforme os diferentes contextos e períodos históricos em que está aplicado. Na Antiguidade, conforme Greven e Baldauf (2007), o módulo era uma unidade de medida utilizada como referência para técnicas construtivas, a partir de elementos conhecidos e de fácil acesso, como as próprias medidas humanas (pés, polegadas e palmos). A partir da necessidade de produção em massa e em série, o módulo evoluiu de uma medida padrão para uma “unidade básica construtiva”, derivada da escala métrica usual, passando a ser adotado pelas indústrias de manufatura (GREVEN; BALDAUF, 2007).

As definições de módulo adotadas na manufatura influenciaram a abordagem do módulo na indústria da construção civil. Contudo, nesse contexto, o conceito de módulo pode estar associado tanto à repetição de medidas modulares, quanto à repetição de componentes e elementos construtivos modulares padronizados utilizados na produção de edificações. Ou seja, o módulo é um conceito genérico que pode ser aplicado ao nível de componentes, elementos e pelos espaços criados por estes.

Essa proximidade de conceitos surgiu no período pós-guerra, a partir da necessidade de produção em massa de edificações nos países emergentes afetados pela guerra. Assim como na manufatura, os sistemas construtivos artesanais passam a ser substituídos pela produção industrializada de edificações, com o objetivo de atingir um processo construtivo racionalizado e reduzir o tempo de construção (GREVEN; BALDAUF, 2007). Para isso, a edificação seria formada pela repetição de componentes e elementos padronizados produzidos em fábrica de forma seriada, e finalmente montados no canteiro de obras. Para que esses componentes e elementos sejam padronizados e denominados módulos, devem apresentar precisão dimensional a partir do módulo básico, conforme os critérios conceituais citados anteriormente (GREVEN; BALDAUF, 2007). Dessa forma, no contexto da construção civil,

⁸EUROPEAN PRODUCTIVITY AGENCY. La coordinación modular en la edificación. Buenos Aires: López, 1962.

o módulo pode ser entendido da mesma forma que na manufatura, em que a edificação é o produto final composto por partes modulares interligadas.

A literatura apresenta diversas definições para o conceito atual de módulo, além das anteriormente descritas. Segundo Fixson (2003), o módulo corresponde a um “agrupamento de componentes com um número definido e padronizado de interfaces”. Contudo, o autor exemplifica que essa definição depende da perspectiva de observação, uma vez que no processo produtivo, o módulo pode ser determinado pelo processo de montagem e na entrega, está relacionado à diferenciação do produto.

Sanchez e Mahoney (2002) definem o módulo como uma unidade básica do produto com interfaces padronizadas. Ou seja, os módulos são unidades independentes, em que uma ação sobre um dos módulos não causa interferências no produto como um todo. Salvador (2007) define que um produto é composto exclusivamente por módulos e, conseqüentemente, um módulo deve ser parte de pelo menos uma variante de produto. Segundo o autor, os módulos são combinados entre si de modo a gerar diferentes configurações de produto. Para isso, os módulos devem ser independentes, o que significa que um produto pode ser gerado, primeiramente, pela produção dos seus módulos e estes, posteriormente, montados em um produto final (SALVADOR, 2007). Conforme o autor, além de independentes, os módulos devem ser intercambiáveis de modo a permitir interações entre si para gerar as variantes de produto.

Com base nessas definições, no presente trabalho, o módulo é entendido como uma unidade funcional independente de um produto e é composto por interfaces padronizadas que possibilitem interações pré-determinadas para a composição de produtos distintos a partir de operações de combinação. Os termos modulação e modularidade derivam do conceito de módulo. A partir do significado etimológico, entende-se por modulação o ato de tornar algo modular através da aplicação do conceito de módulo a um determinado objeto. Com base nessa definição, a modularidade pode ser entendida como a qualidade atribuída a um sistema de objetos a partir de sua modulação.

2.4 Arquitetura e Modularidade do produto

Segundo Wang *et al.* (2010), arquitetura do produto trata-se da representação conceitual dos componentes físicos utilizados para a fabricação de um produto e as interações que afetam o seu funcionamento. Para Ulrich (1995), a arquitetura do produto é a forma pela

qual a função de um produto é atribuída aos componentes físicos. Conforme Fixson (2005), a arquitetura do produto refere-se à descrição compreensiva de um pacote de características do produto, ou seja, representa a estrutura fundamental de um produto. Essas conceituações direcionam a “arquitetura do produto” para a relação entre os componentes, as funções e as interfaces do produto.

A caracterização do produto, conforme Fixson (2005) envolve informações referentes à quantidade e à tipologia dos componentes que formam o produto, à quantidade e aos tipos de interfaces entre esses componentes, ao modo como os componentes funcionam juntos e à forma como esses componentes são produzidos, montados, aplicados e desmontados. Dessa forma, a arquitetura do produto, quando propriamente definida e articulada, pode ser uma ferramenta de coordenação das várias decisões decorrentes do projeto do produto e da produção (FIXSON, 2005).

Em síntese, a “arquitetura do produto” demonstra como os elementos funcionais, a partir de um mapeamento dos componentes físicos e suas especificações, interagem por meio de suas interfaces. Ou seja, a arquitetura do produto corresponde ao mapeamento no qual as funções de um produto são atribuídas aos componentes físicos.

Com base nessa definição, Ulrich (1995) define três características da arquitetura do produto: (a) o mapeamento dos elementos funcionais (diferentes funções do produto); (b) o mapeamento de elementos funcionais em relação aos componentes físicos; e (c) a especificação das interfaces entre os componentes físicos que realizam interações. Fixson (2005) sugere uma estrutura para avaliação da arquitetura do produto que considera duas dimensões: (a) mapeamento função-componente (relacionada às funções e componentes do produto e o mapeamento das funções em relação aos componentes); (b) características das interfaces (tipos de interfaces, nível de dissociação e padronização das interfaces). Embora as duas dimensões sejam necessárias para uma descrição completa da arquitetura do produto, o autor considera que ambas são independentes entre si e devem ser tratadas de forma independente.

O mapeamento, abrangendo os elementos funcionais e suas interconexões, é denominado como “estrutura funcional do produto” (ULRICH, 1995). Uma estrutura funcional pode ser considerada como um conjunto de elementos funcionais, formada por várias funções ou por uma única função. Segundo Ulrich (1995), os componentes físicos implementam os elementos funcionais de um produto, ou seja, as funções de um produto (vedação, suporte de cargas, transporte de energia) são executadas pelos componentes físicos (parede, viga, conduíte).

Contudo, uma única função pode estar relacionada a mais de um componente diferente, bem como um único componente pode realizar diferentes funções. Essas variações, conforme descrito por Ulrich (1995), são definidas pelo tipo de mapeamento entre os elementos funcionais e os componentes físicos: (a) mapeamento de um-para-um (cada componente realiza apenas uma função correspondente); (b) mapeamento de muitos-para-um (muitas funções são atribuídas a um único componente); e (c) um-para-muitos (muitos componentes realizam uma mesma função). Devido às possibilidades de diferentes tipos de mapeamento, dois produtos podem ter a mesma finalidade e apresentar estruturas funcionais diferentes (ULRICH, 1995).

As interações entre os componentes são realizadas por meio de interfaces físicas entre dois ou mais componentes (PIMMLER; EPPINGER, 1994, ULRICH, 1995). De forma complementar, Pimmler e Eppinger (1994) determinam um conjunto de categorias para classificar as relações entre as interfaces de um produto: (a) interações geométricas, que se referem ao encaixe de dois módulos em relação aos parâmetros geométricos, tais como, a forma, tamanho e tolerância; (b) interações materiais (necessidade de troca de material entre dois módulos, como no caso da água que pode transitar de um módulo a outro); (c) interações espaciais (necessidade de proximidade ou orientação entre dois ou mais módulos); (d) interações de energia (necessidade de transferência de energia entre dois módulos); e (e) interações de informação (necessidade de troca de informações entre dois módulos).

De acordo com Ulrich (1995), a especificação das interfaces define o protocolo para a realização das interações, a partir da definição do tipo e da geometria da interface de cada componente. Segundo o autor, a especificação da interface descreve: (a) a força máxima que a interface deve sustentar; (b) as dimensões de contato das superfícies entre os dois componentes que interagem; e (c) as posições e tamanhos dos furos para parafusos.

Fixson (2005) define que as interfaces devem ser avaliadas de forma independente para permitir a investigação dos efeitos individuais no produto. Para isso, são necessárias informações relacionadas a todas as suas dimensões, considerando o papel de cada interface: no funcionamento do produto (tipo de interface); na alteração e desmontagem do produto (reversibilidade) e na substituição de partes do produto (padronização).

O tipo de interface é determinado, principalmente, pela sua quantidade e sua distribuição na composição do produto (FIXSON, 2005). A quantidade de interfaces está relacionada à quantidade de componentes do produto e devem ser consideradas, além das interfaces entre dois componentes, as conexões múltiplas e multidirecionais (FIXSON, 2005).

A reversibilidade está relacionada à possibilidade de desconexão, que infere o potencial de realizar várias mudanças no produto (FIXSON, 2005). Essas características representam uma das vantagens da adoção de uma arquitetura modular, em que as interfaces entre os componentes são dissociadas, a qual depende fortemente da reversibilidade das interfaces (FIXSON, 2005). Para determinar a reversibilidade de uma interface, Fixson (2005) propõe que sejam verificados: o nível de dificuldade para desconectar fisicamente a interface e a posição dessa interface na arquitetura geral do produto. Pontos fracos nas relações de interfaces decorrem da necessidade de alterar ou danificar outros módulos na alteração ou troca de um determinado módulo (FIXSON, 2005).

A padronização das interfaces é referente à substituição de componentes e às famílias de produtos, ou seja, à facilidade com a qual uma interface entre módulos permite a troca (FIXSON, 2005). Essa facilidade está relacionada à reversibilidade das interfaces e às alternativas existentes para alteração do produto. O nível de padronização das interfaces indica se existem poucas ou múltiplas alternativas para substituição de cada componente do produto (FIXSON, 2005).

2.4.1 Aplicação da Arquitetura do Produto no sistema de produção

A estrutura funcional do produto pode determinar os padrões de interação e comunicação das equipes de desenvolvimento (FIXSON, 2005). Dessa forma, conforme Fixson (2005), a estrutura funcional inicialmente definida para o produto afeta a forma como as tarefas serão realizadas e contribui para o desempenho da organização como um todo.

Segundo Fixson (2005), a arquitetura do produto pode ser aplicada de três maneiras: (a) como diretriz com enfoque nas decisões críticas de projeto do produto, ou seja, planejar um produto e as estratégias de produção de modo a auxiliar na identificação de situações críticas a serem observadas nas etapas iniciais de desenvolvimento do produto; (b) como apoio na exploração de vantagens e limitações das estratégias de produção para determinados produtos, ou seja, dar visibilidade e avaliar questões como custo, por exemplo, por meio da utilização em conjunto de ferramentas de avaliação, como análises de custos; (c) no aumento da capacidade de planejamento estratégico de uma empresa ao longo do tempo, a partir de uma compreensão mais profunda sobre como as escolhas relacionadas à definição do produto estão ligadas a decisões relativas à produção.

Assim, para Fixson (2005), decisões importantes no processo são referentes à seleção da quantidade e dos tipos de etapas que serão realizadas para produzir um produto. Essas decisões dependem das características da arquitetura do produto, tais como, a complexidade de cada um dos componentes, o nível de interação entre eles, a quantidade de componentes empregados e em que nível, estes podem ser reutilizados por meio de famílias de produtos (FIXSON, 2005). Uma família de produtos corresponde a um conjunto de produtos finais que são, pelo menos, parcialmente substituíveis sob demanda, possuem semelhanças funcionais fundamentais e compartilham a mesma tecnologia comum e processo de produção (SALVADOR; FORZA; RUNGTUSANATHAM, 2002).

Componentes complexos requerem processos de produção complexos, que resultam em custos de produção relativamente mais altos se comparados a componentes mais simples, que requerem processos produtivos mais simples. Dessa forma, conforme mencionado no tópico 2.2, a simplificação do processo produtivo depende de um produto simplificado, a partir da simplificação de suas partes, para que resulte em rendimentos mais altos e custos mais baixos de produção (FIXSON, 2005). Além disso, interfaces fracamente associadas tendem a minimizar a complexidade e as incertezas em um processo produtivo (FIXSON, 2005).

A redução da complexidade do produto está relacionada à redução do tempo de desenvolvimento desse produto (FIXSON, 2005). Para Fixson (2005), tanto o custo quanto o tempo de desenvolvimento do produto podem ser reduzidos se os componentes puderem ser reutilizados por meio de famílias de produtos ou múltiplas gerações de produto (comunalidade). A reutilização potencializa efeitos de economia de escala decorrentes que podem reduzir o custo unitário do produto, uma vez que permite a distribuição dos custos fixos em volumes maiores de produtos (FIXSON, 2005).

Segundo Ulrich (1995), a habilidade de um sistema de produção em criar variedades de produtos de forma econômica também está relacionada à arquitetura do produto. Se uma variedade de produtos pode ser criada a partir da combinação de componentes, a arquitetura do produto e a flexibilidade do processo produtivo dos componentes definem a economia na produção de variedades de produto (ULRICH, 1995).

A padronização dos componentes corresponde à utilização de um mesmo componente em múltiplos produtos e tem implicações no custo, desempenho e desenvolvimento do produto (ULRICH, 1995). Segundo Ulrich (1995), a padronização dos componentes pode ocorrer em duas situações: (a) quando um componente executa funções

geralmente úteis; e (b) quando a interface do componente é idêntica em mais de um produto diferente.

Quando as interfaces são dissociadas e pode ser adotada uma interface padrão nas interações, o mesmo componente pode ser utilizado em uma variedade de produtos (ULRICH, 1995). Segundo Ulrich (1995), a utilização de um componente padrão representa custo inferior de produção do que a utilização de um componente exclusivo para um único produto. Isso se deve à possibilidade de produzir o componente padrão em maior volume, o que permite maior economia de escala e maior aprendizagem no processo devido à repetição.

Mesmo quando o custo unitário de um componente padrão que se aproxima da aplicação desejada é maior do que de um componente específico, existe redução da complexidade na aquisição, na gestão do estoque, no controle de qualidade e na produção (ULRICH, 1995). Dessa forma, a utilização de um componente padrão pode reduzir a complexidade, os custos e o tempo de ciclo no desenvolvimento de um produto. Além disso, a utilização de componentes comuns permite a redução do risco de manter estoques (FIXSON, 2005).

Para avaliar o impacto das decisões relativas à arquitetura do produto no processo de desenvolvimento do produto, Fixson (2005) propõe um método para determinar: se um projeto é integral ou modular, qual a relação entre funções do produto e seus componentes e como podem ser comparados dois projetos de produto diferentes quanto à relação função-componente. Nesse caso, o termo “componente” pode ser utilizado para representar subsistemas, módulos, ou suas partes (como conectores, grampos e parafusos), dependendo de qual aspecto é avaliado na arquitetura do produto, de modo a permitir maior flexibilidade na avaliação da arquitetura do produto (FIXSON, 2005).

2.4.2 Tipologias de Arquitetura do Produto

As tipologias de arquitetura do produto diferem entre modular e integral, conforme descrito por Ulrich (1995). Uma arquitetura modular, em relação à sua estrutura funcional, é caracterizada por apresentar mapeamento de um-para-um entre os elementos funcionais e os componentes físicos e por interfaces dissociadas entre os componentes. Já, uma arquitetura integral envolve um mapeamento complexo entre as funções e componentes, uma vez que sua estrutura funcional pode apresentar mais de um tipo de mapeamento, além de apresentar interfaces associadas entre os componentes.

Na maioria dos casos, segundo Ulrich (1995), a definição da arquitetura do produto não se restringe à adoção de uma arquitetura modular ou integral, mas é direcionada à análise de quais elementos funcionais devem ser tratados como modulares e quais devem ser tratados como integrais. Assim, a arquitetura do produto determina quais elementos funcionais do produto serão influenciados pela mudança em um componente e quais componentes devem ser alterados para possibilitar essa mudança (ULRICH, 1995). Em relação às possibilidades de mudanças em um produto, podem ser observadas diferenças entre produtos de arquitetura integral e modular.

Em um produto integral, devido às interfaces associadas, a mudança em um dos componentes exige alterações em outro componente, criando uma relação de dependência (ULRICH, 1995). Um produto modular permite alterações em qualquer componente sem afetar os demais componentes (ULRICH, 1995). Dessa forma, uma arquitetura modular permite que as alterações possíveis no produto sejam restritas a um número mínimo de componentes.

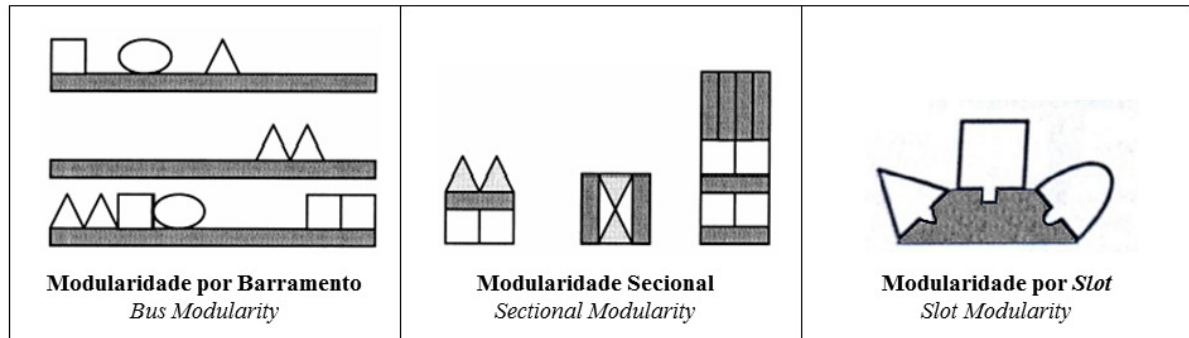
No caso de uma arquitetura modular, em que cada função é mapeada para apenas um componente e as interfaces são dissociadas, uma variedade pode ser criada a partir de um número reduzido de componentes. Em uma arquitetura integral, para que a produção de uma variedade de produtos seja econômica, a produção dos componentes deve ser flexível (ULRICH, 1995). Assim, em uma arquitetura modular, os componentes podem ser utilizados em diferentes produtos nos quais suas funções possam ser empregadas, uma vez que o mapeamento de um-para-um permite maior flexibilidade para a realização de interações e, conseqüentemente, para gerar uma maior variedade de produtos (ULRICH, 1995).

Ulrich (1995) descreve três tipos de arquitetura modular para diferenciar a forma como as interações entre os componentes são organizadas: *bus*, *secional* e *slot*. Os três tipos apresentam as mesmas características de mapeamento da estrutura funcional de um-para-um e interfaces dissociadas.

Uma arquitetura modular tipo *bus* apresenta uma base comum em que os demais componentes físicos são conectados, possibilitando a variação do tipo, da quantidade e da posição desses componentes. Em uma arquitetura modular *secional*, todas as interfaces são do mesmo tipo e não há um elemento único no qual todos os outros componentes se conectam, permitindo que os componentes sejam misturados e combinados em diferentes configurações. Em uma arquitetura modular tipo *slot*, cada interface entre dois componentes é de um tipo diferente em relação às outras interfaces, em que não há intercambiabilidade de componentes na composição das variantes de produtos.

Assim, a organização do sistema modular pode ser classificada em diferentes tipos de modularidade, conforme a padronização dos componentes e as relações entre suas interfaces. Duray *et al.* (2000) descrevem graficamente os tipos de modularidade do produto propostos por Ulrich (1995), conforme apresentado na Figura 1.

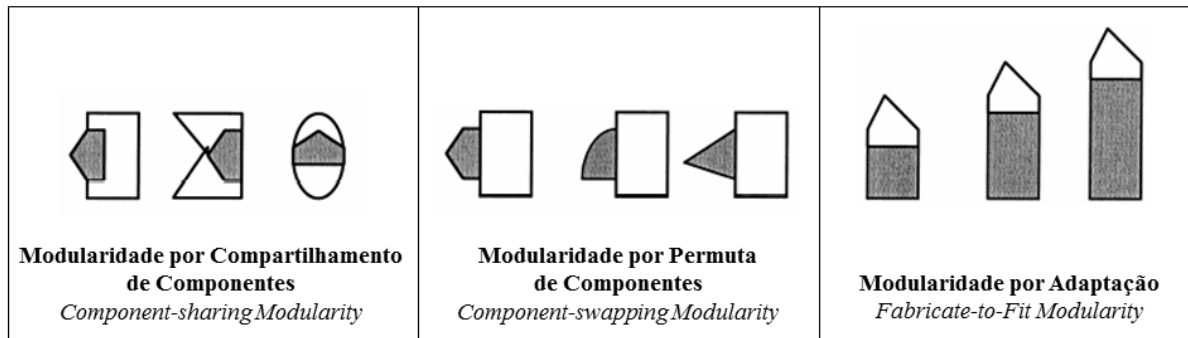
Figura 1 – Tipos de modularidade do produto.



Fonte: adaptado de DURAY *et al.* (2000).

O tipo de modularidade *slot* apresenta três variações, conforme descrito por Ulrich e Tung⁹ (1991, *apud* FIXSON, 2005): (a) modularidade por compartilhamento de componentes (componentes comuns são utilizados em múltiplas variantes do produto, em que as variações são desenhadas a partir de uma família de componentes comuns, promovendo economias de escopo); (b) modularidade por permuta de componentes (utilização de uma família pré-definida de componentes a serem adicionados a um produto base, gerando múltiplas variações desse produto); e (c) modularidade por adaptação (as dimensões de um módulo são alteradas para combiná-lo com outros módulos, em que um ou mais módulos são continuamente variáveis dentro de um limite pré-definido ou praticável).

⁹ ULRICH, K. T.; TUNG, K. Fundamentals of product modularity. Working Paper WP# 3335-91-MSA, MIT Sloan School of Management, Cambridge, MA, 1991. 14p.

Figura 2 – Tipos de modularidade *slot*.

Fonte: adaptado de DURAY *et al.*(2000).

A modularidade por compartilhamento de componentes e a modularidade por adaptação requerem que novos componentes sejam concebidos de forma a serem integrados com os componentes modulares existentes, ou que sejam modificados para produção do produto final (DURAY *et al.*, 2000). Dessa forma, esses dois tipos de modularidade devem ser implementados durante o projeto do produto, nas fases iniciais de processo de desenvolvimento. Conforme Duray *et al.* (2000), os demais tipos de modularidade combinam módulos padrão que não sofrem alterações durante as etapas de montagem e uso, ou final do processo de desenvolvimento do produto.

A modularidade do produto é um conceito central na relação entre estrutura do produto, estrutura do processo, estrutura organizacional e cadeia de suprimentos (SALVADOR, 2007). Em um sistema, a junção dessas unidades ocorre por meio de interações a partir de interfaces. Assim, quando um módulo é substituído por outro, é gerada uma nova variação do produto.

Salvador (2007) destaca a diferenciação entre módulos conforme as funções que exercem em um produto, como: módulos funcionais e módulos de produção. Os módulos funcionais correspondem às partes do produto que implementam funções técnicas e não podem ser fabricados independentemente uns dos outros. Os módulos de produção correspondem às partes do produto, definidas com base apenas em considerações de produção, que podem ser fabricadas individualmente para, posteriormente, serem conectadas. Nesse caso, nenhum módulo de produção pode executar uma função de forma independente.

2.4.3 Customização em massa do produto

Conforme descrito anteriormente, o emprego do módulo no desenvolvimento do produto favorece a flexibilização dos processos construtivos e a possibilidade de padronização e intercambiabilidade, de modo a permitir a criação de variedades de produtos. Por essas características, esse conceito se associa ao de customização em massa. Na customização em massa, as variantes de produto são frequentemente o resultado de diferentes combinações de módulos que devem ser capazes de atender aos diferentes requisitos de clientes (ROCHA; FORMOSO; TZORTZOPOULOS, 2015).

A customização em massa consiste em alcançar uma variedade de produtos e volume elevados, oferecendo produtos que satisfaçam as exigências específicas de diferentes clientes a partir de processos e estruturas organizacionais flexíveis (PINE, 1993). Para Piller e Kumar (2006), a proposta de customização em massa deve ter como partida tornar produtos customizados viáveis para grandes segmentos de mercado e não apenas para alguns clientes privilegiados. Assim, é importante definir módulos que atendam tantos requisitos quanto possível e que também possam ser utilizados em um grande número de variantes do produto (FIXSON, 2005).

A intercambiabilidade entre módulos permite a diferenciação do produto por meio da variação de um ou mais módulos, enquanto o restante do produto se mantém inalterado (SALVADOR, 2007). Para a customização em massa, o número de diferentes interfaces padrão determina as combinações possíveis entre os módulos e, conseqüentemente, as variantes de produto que podem ser criadas (ROCHA; FORMOSO; TZORTZOPOULOS, 2015). Dessa forma, é possível atender exigências de mercado de produtos moderadamente diferentes por meio da customização em massa.

O ajuste das partes do produto, anteriormente à etapa diferenciação do produto, deve possibilitar que o maior número de partes ou componentes possível seja comum para todas as variantes do produto que serão produzidas. Contudo, isso demanda um esforço coordenado das equipes de projeto e de produção para atingir esses benefícios. A definição da parte do produto que será padronizada, e do que será customizado, direciona as atividades de produção que irão ocorrer antes ou depois da diferenciação do produto (ROCHA; KEMMER, 2013).

Assim, um projeto de produto modular possibilita: (a) economias de escala pela produção de grandes quantidades de produtos a partir da produção de altos volumes de componentes padronizados ao de produtos padronizados (PINE, 1993) e que permitam adiar a produção dos componentes que diferenciam o produto até o último momento possível

(FEITZINGER; LEE, 1997); (b) economias de escopo, pela diminuição do custo total da produção média a partir da repetição de módulos em várias versões do produto (PINE, 1993); (c) a montagem dos componentes para todas as variantes de produtos em fases anteriores ao processo de montagem do produto final customizado (FEITZINGER; LEE, 1997).

Portanto, um produto com projeto modular apresenta a flexibilidade necessária para a customização rápida e econômica. Ou seja, a modularidade do produto mostra-se pré-condição para a customização em massa. A flexibilidade permite a produção de diferentes módulos separadamente e ao mesmo tempo reduz significativamente o tempo necessário para a produção (FEITZINGER; LEE, 1997).

A aplicação dos princípios da arquitetura modular no desenvolvimento do produto permite o aumento no nível da entrega de produtos customizados e a redução dos custos de produção a partir da reutilização dos módulos em múltiplos projetos (HOFMAN; VOORDIJK; HALMAN, 2009). Segundo Fixson (2005), reagrupar os componentes em um número menor de módulos reduz a complexidade e o tempo de desenvolvimento do produto.

A modularidade do produto permite a criação de variedades na etapa final de montagem, ou seja, no último estágio do processo produtivo (ULRICH, 1995). Segundo Feitzinger e Lee (1997), adiar diferenciação do produto para um cliente específico até o último momento possível na cadeia de suprimentos (cadeia de suprimento, produção e distribuição) é fator essencial para a customização em massa eficiente. Trata-se da diferenciação tardia do produto que consiste em adiar até o último momento possível no processo o momento em que um produto se torna único (FIXSON, 2005).

Os riscos envolvidos estão relacionados a manter estoques de partes do produto que possuem alguma diferenciação para atender a customização. Este risco deve-se a uma grande possibilidade de que as partes estocadas permaneçam muito tempo sem serem utilizadas, gerando custos para a manutenção do estoque, ou até mesmo que essas partes não venham a ser utilizadas tendo, então, que ser descartadas. Por essa razão, o adiamento da diferenciação do produto pode reduzir estoques e os riscos decorrentes de sua manutenção.

A economia nos custos de produtos customizados resulta da redução dos riscos e dos custos de manter estoques a partir da padronização de componentes ou produtos (PILLER; KUMAR, 2006). Na produção em massa os componentes padronizados ou plataformas podem ser utilizados como estratégia para redução do custo unitário dos produtos e distribuição dos custos fixos sobre maiores volumes de produção (FIXSON, 2005).

Feitzinger e Lee (1997) descrevem três princípios organizacionais de projeto para um programa eficiente de customização em massa: (a) a concepção de um produto deve partir de

módulos independentes, que possam ser montados em diferentes combinações, de forma fácil e econômica; (b) o processo de produção deve ser projetado de modo que também seja composto por módulos independentes, que podem ser movidos ou rearranjados facilmente para suportar diferentes modelos de distribuição em rede; e (c) a cadeia de suprimentos (posicionamento e localização do estoque, número e estrutura das instalações de produção e distribuição) deve ser projetada para fornecer o produto para customização de forma eficiente, com flexibilidade e capacidade de resposta rápida para as solicitações de customização dos clientes.

2.4.4 Modularidade do Produto na produção de habitações customizadas

Apesar das diferenças entre a manufatura e a construção civil, a adoção do conceito de modularidade do produto pode contribuir para a customização em massa no desenvolvimento de projetos de habitações (ROCHA; FORMOSO; TZORTZOPOULOS, 2015). Contudo, na construção civil, a modularidade ainda é vista como um conceito de gestão relativo à concepção do produto e à produção convencional sem considerar a visão da customização em massa para oferecer variedades de produtos (LENNARTSSON; BJÖRNFOT, 2010).

Para Lennartsson e Bjornfot (2010), a adoção do controle do processo produtivo e da pré-fabricação na produção de habitações industrializadas busca mudar a forma como as tarefas são realizadas. Contudo, grande parte do trabalho produtivo, geralmente, é realizada no local da obra, devido ao caráter temporário (dos agentes intervenientes envolvidos) único e de imobilidade das edificações (ROCHA; FORMOSO; TZORTZOPOULOS, 2015). Na produção de habitação empregando sistemas construtivos industrializados, a interação entre atores do processo é tão importante quanto na produção tradicional (LENNARTSSON; BJÖRNFOT, 2010).

A principal diferença entre a produção industrial e a construção civil do ponto de vista do produto, refere-se à natureza das partes que formam o produto (ROCHA; FORMOSO; TZORTZOPOULOS, 2015). Segundo os autores, na produção industrial, os componentes executam funções específicas, de modo a garantir a funcionalidade do produto da forma mais eficiente, enquanto na produção de um edifício devem ser considerados também os espaços que o compõem e definem os usos e as funções desse produto.

As diferenças entre a construção civil e a produção industrial são sintetizadas por Rocha, Formoso e Tzortzopoulos (2015), de modo a permitir um melhor entendimento da arquitetura do produto no ponto de vista da construção civil dentro da cadeia de suprimentos (Tabela 1).

Tabela 1 - Diferenças entre a construção civil e a produção industrial para a modularidade do produto, descritas por Rocha, Formoso e Tzortzopoulos (2015)

Perspectivas	Manufatura	Construção Civil
Produto	Componentes têm um papel central na definição da arquitetura do produto.	Edifícios combinam componentes e vazios espaciais, que desempenham as funções mais importantes do produto.
Processo	Fornecedores entregam módulos complexos que são simplesmente montados pelo fabricante principal.	Muito trabalho é normalmente realizado no local, através de tecnologias tradicionais.
Cadeia de suprimentos	A cadeia de suprimentos se envolve na concepção e produção de módulos para um grande número de produtos.	Cadeias de suprimentos temporárias geralmente têm poucos incentivos para produzir o mesmo módulo para um grande número de projetos (diferentes).

Fonte: adaptado de Rocha, Formoso e Tzortzopoulos (2015).

Nos projetos de produtos habitacionais, a modularidade e a variedade para customização podem ser alcançadas a partir da variação dos usos dos espaços ou ambientes (*layout* da edificação), ou pelo aproveitamento da mesma configuração desses ambientes em vários projetos (HOFMAN; VOORDIJK; HALMAN, 2009). A conceituação de modularidade do produto para produção de habitações proposta por Rocha, Formoso e Tzortzopoulos (2015) inclui três elementos: (a) perspectivas de arquitetura do produto; (b) interfaces entre os módulos; e (c) ferramentas operacionais para apoiar a tomada de decisão.

Em relação às perspectivas de arquitetura do produto discutidas anteriormente, uma edificação pode ser classificada de acordo com seus componentes, como também em função das diversas utilizações de seus espaços (VEENSTRA; HALMAN; VOORDIJK, 2006). Ou seja, as perspectivas de arquitetura do produto para um projeto habitacional definem as funções requeridas para o produto e o mapeamento dos componentes físicos (ROCHA; FORMOSO; TZORTZOPOULOS, 2015). Conforme os autores, para essa classificação, as ações realizadas pelos usuários nos espaços que compõem a edificação (vazios espaciais) são definidas com funções primárias, enquanto as ações realizadas pelos componentes

construtivos de um edifício (massa sólida) são definidas como funções secundárias. As funções secundárias permitem que as funções primárias sejam realizadas confortavelmente pelos usuários (ROCHA; FORMOSO; TZORTZOPOULOS, 2015). Assim, para a concepção de um produto habitacional são identificadas as funções realizadas nos vazios espaciais e mapeados os componentes físicos que formarão esses vazios. Posteriormente, se determina como estes componentes irão interagir por meio de suas interfaces.

Os componentes e os espaços de uma edificação devem ser geometricamente e espacialmente coordenados para permitir que as funções primárias sejam realizadas de forma adequada pelos usuários (PIMMLER; EPPINGER, 1994). Dessa forma, as interações espaciais e geométricas, realizadas por meio das interfaces entre os módulos, desempenham um papel-chave na modularidade do produto para construção de habitações (ROCHA; FORMOSO; TZORTZOPOULOS, 2015). Conforme os autores, as interações geométricas correspondem ao encaixe físico entre módulos.

No caso das edificações, as interações geométricas podem ser relacionadas, por exemplo, às conexões entre os painéis de vedação vertical, que garantem a estabilidade do sistema estrutural da edificação. As interações espaciais estão relacionadas à coordenação espacial entre módulos (ROCHA; FORMOSO; TZORTZOPOULOS, 2015). Os elementos estruturais de uma edificação devem ser espacialmente coordenados para que as cargas sejam transferidas de forma adequada, o que também exige que esses elementos sejam geometricamente coordenados.

Para avaliar a arquitetura do produto de edifícios habitacionais, Rocha, Formoso e Tzortzopoulos (2015) desenvolveram indicadores capazes de medir o grau de utilização do módulo, avaliar e comparar as economias de escopo para diferentes soluções projeto e identificar a necessidade de melhorar as interfaces entre os módulos. Esses indicadores foram definidos pelos autores como: (a) matriz de combinação de módulo (*module combinations matrix*); (b) matriz de interações de módulo (*module interactions matrix*).

A partir da aplicação da matriz de combinação de módulo é possível demonstrar de forma gráfica como os módulos são utilizados em diversas variantes de produto (Tabela 2). Através dessa descrição gráfica, é possível avaliar o grau de utilização do módulo a partir de uma métrica definida pelo índice de utilização do módulo (*module use index* - MUI). O MUI é representado por um número decimal, resultante da média aritmética dos números correspondentes à quantidade de repetições de cada módulo nas variantes de produto. Um valor alto de MUI significa que muitos módulos são comuns a diversas variantes de produto. Assim, quanto maior o MUI, maior a economia de escopo (uma vez que representa um uso

mais eficiente do módulo) e um processo de produção simplificado (ROCHA; FORMOSO; TZORTZOPOULOS, 2015).

Tabela 2 - Matriz de Combinações de Módulo de um produto de arquitetura hipotético

	Produto variante A	Produto variante B	Produto variante C	Número de usos
Módulo 1	2		1	3
Módulo 2		1	2	3
Módulo 3	1			1
Módulo 4		1	1	2
<i>MUI</i>				2.25 (9/4)

Fonte: adaptado de Rocha, Formoso e Tzortzopoulos (2015).

O índice de utilização do módulo pode ser aplicado durante o processo de desenvolvimento do produto para avaliar e comparar a utilização dos módulos (economias de escopo) para diferentes soluções de projeto (ROCHA; FORMOSO; TZORTZOPOULOS, 2015). Segundo os autores, também permite avaliar a possibilidade de adoção de uma diferenciação tardia do produto. A definição de módulos comuns que podem ser utilizados em diversas variantes do produto permite que sejam produzidos antecipadamente à solicitação do produto, uma vez que serão utilizados no atendimento a diversas solicitações futuras (ROCHA; FORMOSO; TZORTZOPOULOS, 2015). Dessa forma, os módulos são produzidos com base nas previsões de solicitações do produto, sendo este montado apenas quando um pedido do cliente é recebido.

A matriz de interações de módulo possibilita a visualização, de forma gráfica, das interfaces que existem entre os módulos em cada uma das variantes de produto (Tabela 3). A aplicação consiste na indicação dos tipos de interfaces resultantes da interação de cada módulo com outro que se relaciona. Dessa forma, é possível identificar o número de interações entre os módulos em uma família de produtos, ou seja, quais módulos interagem com outros módulos e quais as variações de interfaces existentes no produto. Essa matriz pode ser utilizada para identificar a necessidade de melhorar as interfaces entre os módulos (ROCHA; FORMOSO; TZORTZOPOULOS, 2015).

Tabela 3 - Matriz de Interações de Módulo de um produto de arquitetura hipotético

	Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3	Módulo 4
Módulo 1	A			
Módulo 2	C			
Módulo 3	A			
Módulo 4		B, C		

Fonte: adaptado de Rocha, Formoso e Tzortzopoulos (2015).

Esses indicadores foram aplicados por Rocha, Formoso e Tzortzopoulos (2015) na avaliação da arquitetura do produto de unidades habitacionais customizadas, em que foram identificadas oportunidades de melhoria a partir dos resultados obtidos. Os estudos mostraram que mesmo uma arquitetura altamente modular, pode ser beneficiada a partir de uma análise cautelosa das combinações de módulos. A aplicação prática mostrou a utilidade desses indicadores na melhoria da modularidade de um produto existente. A utilização desses recursos pode ser ainda mais eficiente quando aplicada nas etapas iniciais de desenvolvimento do produto.

2.5 Considerações Finais sobre o capítulo

Este capítulo fez uma apresentação dos conceitos gerais de módulo, modularidade do produto e customização em massa com implicações no processo de produção em fábrica e da aplicação desses conceitos na indústria construção civil para a produção de habitações. Foram abordados, principalmente, os conceitos de módulo, de arquitetura e modularidade do produto e sua relação com a produção e com a customização em massa.

A modularidade do produto abrange uma série de conceitos e princípios provenientes da manufatura que, quando adaptados, podem ser aplicados ao desenvolvimento de produtos da construção civil. A aplicação destes conceitos pode trazer contribuições importantes para o segmento de EHIS que utilizam sistemas construtivos industrializados, tendo em vista o potencial para permitir a customização em larga escala, minimizando os impactos na linha de produção, com repercussão na redução de custos.

A adoção da modularidade do produto no projeto de habitações pode contribuir para a customização em massa, uma vez que favorece a flexibilização dos processos construtivos e a possibilidade de padronização e intercambiabilidade, permitindo a criação de variedades de

produtos. Assim, é importante definir módulos padronizados que possam ser utilizados em um grande número de variantes do produto, possibilitando a redução dos riscos e dos custos de manter estoques e a diferenciação tardia do produto para um cliente específico até o último momento possível na cadeia de suprimentos.

A utilização de indicadores de modularidade do produto nas etapas iniciais de desenvolvimento de edifícios habitacionais permite avaliar a utilização dos módulos e suas interfaces, bem como as economias de escala e escopo para diferentes soluções projeto.

3 O SISTEMA *LIGHT WOOD FRAME* (LWF)

Este capítulo faz uma apresentação do sistema construtivo *Light Wood Frame*, a partir de uma introdução conceitual e funcional do sistema estrutural e da descrição de seus principais elementos. Aborda, principalmente, os subsistemas de vedação e os materiais de revestimento que representam os elementos de maior enfoque do sistema construtivo nesta pesquisa.

3.1 Conceituação de industrialização e racionalização adotadas no trabalho

Para o desenvolvimento deste capítulo, inicialmente é necessário definir como alguns conceitos, comumente empregados no contexto da construção civil, serão empregados ao longo deste trabalho. Assim, mostra-se importante estabelecer as respectivas definições de industrialização e racionalização e estabelecer as relações entre os mesmos e o contexto da presente pesquisa.

A industrialização da construção, de acordo com Sabbatini (1989), consiste em um processo evolutivo, que tem como objetivo aumentar a produtividade e o nível de produção e aprimorar o desempenho da atividade construtiva. Esse processo ocorre por meio de ações organizacionais e da implementação de inovações tecnológicas, métodos de trabalho e técnicas de planejamento e controle (SABBATINI, 1989).

Segundo Fabrício (2008), a industrialização das construções tem como objetivo aplicar a lógica da indústria seriada de massa na construção de edifícios, por meio do aumento da produtividade da mão de obra e da redução dos desperdícios. Dessa forma, a industrialização é baseada no aumento de investimento sobre o processo construtivo a partir do deslocamento de parte do trabalho do canteiro de obras para a fábrica, e do emprego máquinas e métodos de organização e parcelamento do trabalho, de forma a permitir a produção em massa de edifícios (FABRÍCIO, 2008).

Para Fabrício (2008), a industrialização das construções no contexto contemporâneo ocorre a partir da associação de novas práticas de gestão de projeto e produção e de inovações tecnológicas. Conforme o autor, essas inovações estão voltadas aos materiais e componentes construtivos e a novas práticas de gestão de caráter sistêmico, envolvendo o processo de desenvolvimento de produto (projeto), o planejamento do empreendimento, a gestão de

materiais em obras (fluxo) e a melhoria da qualidade de serviços e processos (gestão da qualidade).

Ao contrário da industrialização das construções baseada na estandardização do ambiente construído e na produção em série por meio de máquinas, essa nova industrialização é baseada em materiais e componentes construtivos com tecnologia agregada e no emprego de técnicas gerenciais modernas (FABRÍCIO, 2008). As técnicas gerenciais visam ampliar a produtividade e melhorar a qualidade do edifício quanto ao atendimento às necessidades do usuário (FABRÍCIO, 2008).

Segundo Fabrício (2008), a industrialização contemporânea pode se enquadrar como uma racionalização ampliada e integrada (várias etapas do empreendimento e diversos agentes) da produção do edifício. Dessa forma, mostra-se necessária uma maior integração entre as etapas (formulação do empreendimento, projetos, obra e pós-ocupação) e entre os próprios agentes envolvidos nos empreendimentos (FABRÍCIO, 2008).

As definições de racionalização geralmente apresentam como objetivos a diminuição dos desperdícios e o aproveitamento pleno dos insumos disponíveis. Conforme Sabbatini (1989), a racionalização corresponde a um processo composto pelo conjunto de todas as ações que tenham por objetivo tornar mais eficiente o uso dos recursos materiais, humanos, organizacionais, energéticos, tecnológicos, temporais e financeiros disponíveis na construção em todas as suas fases.

Segundo Franco (1992), a racionalização no contexto da construção civil pode ser entendida como o aumento da eficiência das atividades construtivas, em que seus princípios são aplicados às técnicas e métodos construtivos como forma de se alcançar um melhor resultado nos desenvolvimentos das edificações. Com base nessas definições, pode-se concluir que a possibilidade de racionalização é maior conforme aumenta a quantidade de etapas do processo de produção que são transferidas do canteiro para a fábrica. Assim, a racionalização propõe o uso racional de recursos, sem mudança da base produtiva. A industrialização pressupõe o uso racional de recursos a partir de uma mudança na base produtiva e dentro de um contexto organizacional elevado.

3.2 Sistema de construção a seco

3.2.1 Sistema Light Steel Frame e Sistema Light Wood Frame

O sistema de construção a seco compreende os sistemas construtivos, *Light Wood Frame* (LWF) e *Light Steel Frame* (LSF). A principal característica desse sistema é o uso de uma estrutura de perfis leves de aço (*steel frame*) ou de madeira (*wood frame*), contraventadas com placas estruturais OSB, que unidas, funcionam em conjunto, proporcionando rigidez, forma e sustentação à edificação (LPBRASIL, 2011). Segundo a LPBrasil¹⁰ (2011), a utilização desse sistema é indicada para a construção de edificações de pequeno ou médio porte, de até cinco pavimentos.

Os sistemas LWF e LSF são compostos por subsistemas, que correspondem a conjuntos de elementos e cumprem uma ou mais funções técnicas: subsistema de fundação, subsistema de piso, subsistema de vedação, subsistema de cobertura, subsistema de instalações elétricas e hidrossanitárias.

O subsistema de vedação, foco do presente trabalho, é formado por paredes compostas por materiais com função estrutural, de isolamento térmico-acústico, de vedação e acabamentos. As paredes que constituem a estrutura são denominadas de painéis, definidos de acordo com sua função: (a) estruturais (ou autoportantes, quando compõem a estrutura, suportando as cargas da edificação, e podem ser tanto internos quanto externos); (b) não estruturais (funcionam apenas como fechamento externo ou divisória interna, ou seja, sem ter função estrutural).

Os painéis têm, ainda, a função de distribuir uniformemente as cargas e encaminhá-las até o solo. Estes são compostos por grande quantidade de perfis muito leves denominados montantes, guias superiores e inferiores, além das placas de fechamento interno e externo. Os montantes e as guias, geralmente, são definidos por seções transversais padrão. Contudo, para edificações que necessitam de um isolamento térmico maior, o dimensionamento dos montantes depende mais da espessura do isolamento térmico do que dos requisitos estruturais. A espessura final da parede irá depender da seção dos montantes e da sua composição de camadas (placas).

¹⁰ A LPBrasil é um dos principais fornecedores de materiais para construção CES no Brasil e possui mais de 20 fábricas na América do Norte, no Chile e no Brasil. Tornou-se pioneira na fabricação de painéis OSB nos Estados Unidos, tendo mais de 30 anos de experiência na produção de painéis OSB. Atualmente a empresa fabrica e comercializa uma linha completa de produtos para construção CES, atendendo principalmente o setor da construção civil, dentre distribuidores de materiais de construção, distribuidores locais, construtoras, embaladores e indústrias em geral.

Os painéis fornecem espaços internos necessários para a passagem das instalações (água, eletricidade, telefone). Dessa forma, os conduítes e tubulações são embutidos nos painéis ou no forro e seguem, preferencialmente, paralelos aos montantes. Esses conduítes podem ser previamente instalados em fábrica durante a produção dos painéis.

O sistema de construção a seco revela-se uma alternativa tecnológica bastante promissora para a racionalização do processo de construção, especialmente no caso de empreendimentos de habitações de interesse social (EHIS). Por se tratar de um sistema construtivo industrializado, os subsistemas que compõem a edificação podem ser pré-fabricados e montados por equipes especializadas em sequências definidas para a execução na obra, e de forma independente, o que permite maior rapidez na etapa de produção de um empreendimento (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012).

Atualmente, no Brasil, os sistemas LWF e LSF se encontram em fase de implantação e adaptação pelas construtoras do país e a produção de habitações nesse sistema construtivo ainda é baixa (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010). Contudo, empresas brasileiras instaladas no sul do país têm demonstrado interesse na construção de habitações no sistema LWF e conquistaram a obtenção de financiamentos imobiliários junto à Caixa Econômica Federal para implantação desse sistema no país. Paralelamente, o setor técnico acadêmico e industrial madeireiro também têm realizado esforços para divulgação e implantação desse sistema (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010).

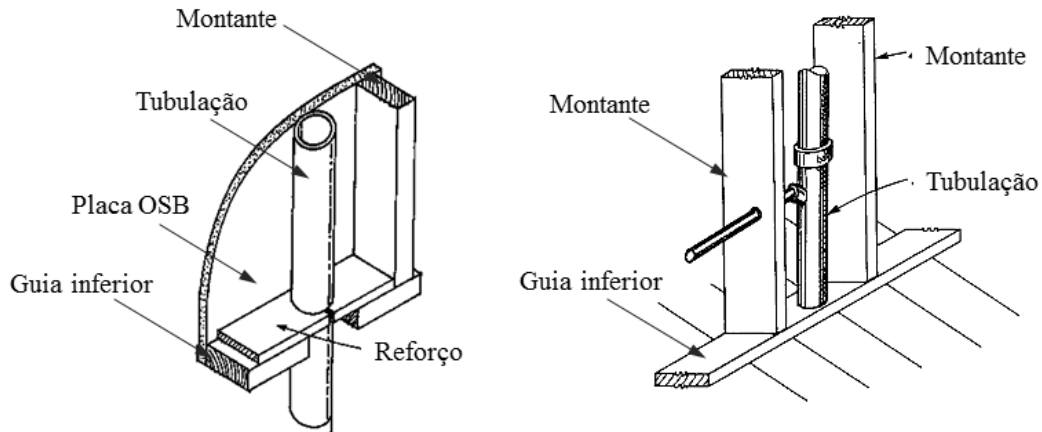
A utilização de um sistema construtivo como o LWF requer que os projetos considerem como será o processo de montagem da edificação. Uma vez que sistemas industrializados são incompatíveis com improvisações em canteiro de obras, que podem acarretar prejuízos na produtividade, na qualidade, e no desempenho das construções, é fundamental que as etapas de projeto do produto sejam desenvolvidas em acordo com as implicações construtivas durante o processo de produção.

A possibilidade de racionalização, especialmente a redução de prazo, é maior conforme aumenta a quantidade de etapas do processo de produção que são transferidas do canteiro para a fábrica. Dessa forma, as atividades no canteiro podem ser reduzidas à execução do posicionamento dos painéis e de suas ligações (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012).

Os espaços internos formados entre as placas de vedação devido à configuração dos painéis permitem a passagem das instalações entre os montantes. Os dutos e tubulações não devem ser inseridos no interior dos montantes, onde ficam sujeitos a perfurações pelos parafusos utilizados na fixação das placas de vedação. Dessa forma, devem ser posicionados

paralelamente às almas dos montantes (pelo lado externo), ou livres (nos vãos entre os perfis), conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 - Passagem das instalações nos painéis no sistema LWF



Fonte: adaptado de Anderson (1975).

A utilização de *kits* industrializados para as instalações elétricas e hidráulicas pode gerar uma maior economia na produção de edificações padronizadas em LWF, uma vez que seguem a industrialização da produção. Os *kits* de instalações podem ser embutidos previamente nos painéis de parede durante o processo produtivo em fábrica, o que reduz as atividades realizadas no canteiro de obras.

Conforme Santiago, Freitas e Crasto (2012), a execução de furos nos perfis e a necessidade de suportes e montagens para a fixação das instalações devido à ausência de massa no interior dos painéis, demandam cuidados específicos para manutenção da estabilidade do sistema. O posicionamento e as passagens das instalações devem ser previstos em projeto, de forma a diminuir a quantidade de furos e permitir a compatibilização com a estrutura. O mapeamento em projeto das instalações evita danos às tubulações na execução de futuros furos nas paredes ou reparos. O *kit* de instalações hidráulicas é composto de cavalete com as tubulações rígidas de esgoto que ficam embutidas nas paredes. Para as instalações elétricas, o *kit* é composto pelo quadro elétrico e conjunto de fios com comprimentos pré-definidos em projeto (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012).

Conforme descrito anteriormente, existem sistemas de instalações especialmente projetados para construções do tipo LWF. No caso das instalações hidráulicas, o sistema PEX (polietileno reticulado) apresenta maior flexibilidade, facilidade e velocidade de instalação, e se adapta melhor às construções industrializadas (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012).

Esse sistema é composto por tubos flexíveis, que reduzem a necessidade de peças extras (conexões) para realizar mudanças de direção.

No projeto de instalações hidráulicas para uma edificação em LWF, é recomendada a utilização de bacias sanitárias com caixa acoplada, que são alimentadas por pontos comuns de água fria (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012). Segundo Santiago, Freitas e Crasto (2012), a utilização de descargas convencionais nesse sistema pode causar vibrações significativas na estrutura.

3.3 Métodos construtivos utilizados nos sistemas de construção a seco

Os métodos construtivos utilizados na execução de edificações em sistemas de construção a seco variam conforme o projeto e a empresa construtora. A construção pode se dar mediante o método *stick*, método por painéis ou, ainda método modular (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012). No método *stick*, todas as etapas de produção são realizadas no local da obra, desde a montagem da estrutura com perfis até a fixação das placas e passagem das instalações. No método de painéis, a produção de paredes, lajes e coberturas é realizada em fábrica, para montagem posterior no local da obra. O método modular corresponde a unidades completamente pré-fabricadas e entregues no local da obra com todos os acabamentos e instalações.

3.3.1 Método Stick

O método *stick* pode ser aplicado em locais onde a utilização de métodos pré-fabricados (de painéis e modular) não é viável. Contudo, tem sido substituído pelo método por painéis devido à melhor qualidade e precisão dos componentes da estrutura e à rapidez de execução (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012).

Nesse método, os perfis de madeira e as placas de vedação são cortados no canteiro de obras conforme as definições do projeto estrutural. Os perfis podem ser perfurados previamente para a passagem das instalações. Posteriormente, são montados a estrutura de piso (quando houver), os painéis, e a cobertura. O fechamento por placas de vedação e revestimento, assim como as instalações são executados após a montagem da estrutura dos painéis.

Apesar de representar um aumento de atividades na obra, no método *stick* as ligações entre os perfis são executadas mais facilmente, uma vez ficam completamente aparentes antes da fixação das placas de vedação. Além disso, não é necessário prever um local para a pré-fabricação do sistema no canteiro e a produção a partir de peças menores facilita o transporte dos componentes (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012).

3.3.2 *Método por Painéis*

No método por painéis, a produção de painéis de paredes, lajes e coberturas é realizada em fábrica, para montagem posterior no canteiro de obras. Os painéis de vedação, de piso e a cobertura são conectados no local, a partir de técnicas convencionais (parafusos auto atarraxantes). A produção em fábrica proporciona um ambiente mais controlado para a execução dos subsistemas que compõem as edificações LWF, aumenta a precisão dimensional do sistema e reduz o trabalho na obra, permitindo uma maior velocidade de produção.

Os materiais de fechamento, como as placas de vedação (OSB, gesso acartonado e cimentícia) e as esquadrias (portas e janelas) também podem ser instalados nos painéis previamente, em fábrica, para reduzir o tempo de montagem no local. Contudo, é possível estabelecer um local adequado para a pré-fabricação do sistema no próprio canteiro de obras, que depende da disponibilização de espaço e de mão de obra especializada nessas atividades. No sistema por painéis ou modular, os eletrodutos e as tubulações hidráulicas são previamente instalados em fábrica durante a produção dos painéis.

3.3.3 *Construção Modular*

O método modular corresponde a unidades completamente pré-fabricadas (edificações inteiras, módulos sanitários ou outros ambientes) e entregues no local da obra com os acabamentos internos (revestimentos, louças, metais, mobiliários) e as instalações hidráulicas e elétricas finalizadas. As unidades ou módulos concluídos podem ser estocados no local da obra, para posterior execução do posicionamento dos módulos e de suas ligações.

3.4 Elementos de vedação (painéis) do sistema LWF

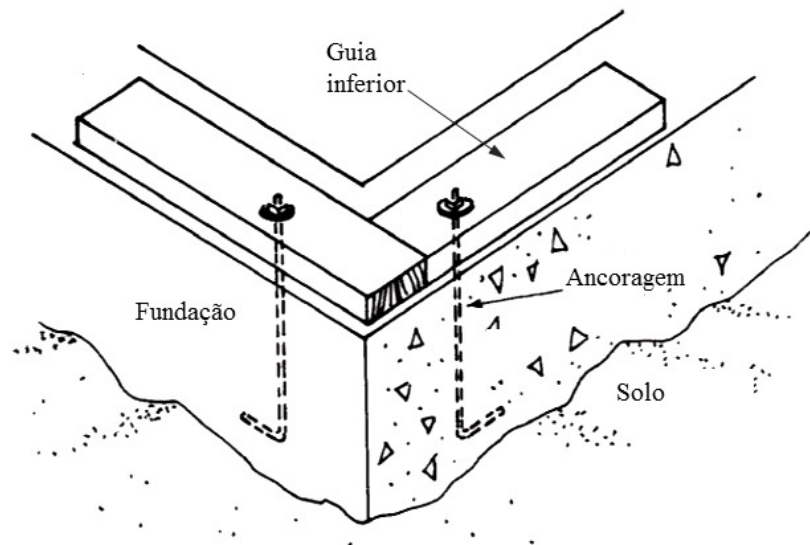
As paredes que constituem uma edificação LWF, associadas a elementos de vedação, exercem a mesma função das paredes das construções convencionais. Os painéis estruturais de vedação estão sujeitos a cargas horizontais (vento, abalos sísmicos), e verticais (peso próprio da estrutura, dos componentes construtivos, e da sobrecarga devido ao uso), e têm a função de absorver esses esforços e transmiti-los diretamente sobre a fundação ou outros painéis estruturais (AWC, 2001, SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012).

O sistema de fechamento vertical para edificações em *LWF* deve ser constituído por elementos leves e compatíveis com o conceito da estrutura dimensionada para suportar vedações de baixo peso próprio (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012). Além disso, deve permitir a aplicação de materiais e soluções racionalizadas, que promovam maiores níveis de industrialização da construção e a redução das etapas de execução.

A estrutura dos painéis é formada por quadros estruturais compostos por perfis verticais muito leves de madeira denominados montantes, guia inferior, e guia dupla superior, geralmente unidos por pregos ou conectores metálicos (AWC, 2001). Essa estrutura interna dos painéis não é capaz de resistir isoladamente aos esforços horizontais que solicitam a estrutura, como os provocados pelo vento. Esses esforços podem ocasionar perda de estabilidade, causando deformações que podem provocar o colapso da estrutura (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012). Para garantir a estabilidade estrutural, é necessário prever ligações rígidas ou o emprego de elementos capazes de transferir esses esforços para as fundações.

Para evitar os movimentos de translação (deslocamento lateral) ou tombamento (com rotação da edificação) devido à pressão do vento, os painéis devem ser ancorados na fundação (Figura 4). A definição do tipo de ancoragem segue o cálculo estrutural e depende do tipo de fundação e das solicitações que ocorrem na estrutura (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012)

Figura 4 - Ancoragem dos painéis de vedação no sistema LWF



Fonte: adaptada de AWC (2001).

Podem ser utilizadas combinações associadas à ancoragem da estrutura para aumentar a resistência do sistema aos esforços horizontais, conforme descrito por Santiago, Freitas e Crasto (2012): (a) uso de contraventamento dos painéis, que consiste na fixação de perfis de madeira em “X” nas faces dos painéis; (b) fechamento dos painéis com placas estruturais que absorvam as cargas laterais que solicitam a estrutura.

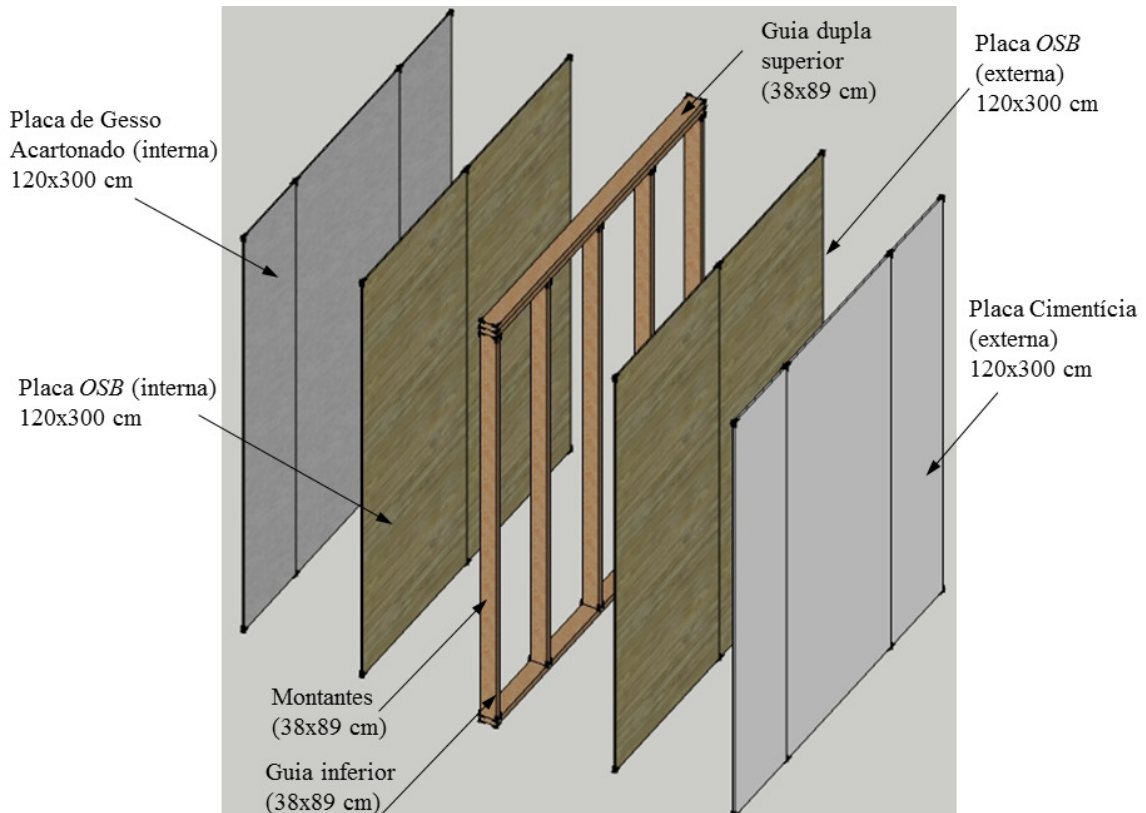
O contraventamento é realizado por meio dos componentes de vedação dos painéis estruturais, resultando em paredes diafragma, ou de cisalhamento. Os componentes de vedação são posicionados interna e externamente aos quadros formados pelos montantes e guias, de forma a revestir os painéis estruturais. Os produtos disponíveis para o fechamento de painéis em LWF são fornecidos em forma de placas ou chapas, que apresentam resistências variadas conforme o material de composição e sua espessura final.

As placas de aglomerado de madeira, denominadas OSB (*Oriented Strand Board*), possuem alta resistência físico-mecânica e são responsáveis pelo contraventamento da estrutura dos painéis de vedação. O revestimento dessas placas pode ser realizado através de vários materiais, como placas cimentícias externamente, e placas de gesso acartonado internamente (Figura 5). Sobre essas placas podem ser aplicados uma grande diversidade de materiais de acabamento como pintura, cerâmicas, pedras e revestimentos industrializados.

Geralmente, as placas são dimensionadas com largura de 120 centímetros, e definem a modulação dos montantes dos montantes em valores múltiplos (espaçamento de 40 ou 60 centímetros entre eixos) (AWC, 2001, SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012). As placas podem ser fixadas sobre os quadros estruturais no sentido vertical ou horizontal, sendo que o

vertical é o mais comum (AWC, 2001), como mostra o esquema da Figura 5. No caso das placas cimentícias é realizado o tratamento de juntas de dilatação (aberta, aparente ou invisível) para absorção das tensões ocasionadas pelas movimentações térmicas e higroscópicas.

Figura 5 - Configuração das placas de vedação nos painéis LWF



Fonte: adaptado de Arauco (2002); Santiago, Freitas e Crasto (2012).

As placas estruturais aumentam a resistência do painel, uma vez que absorvem as cargas horizontais e as transmitem à fundação. Conforme Pereira Junior (2004, apud SANTIAGO, FREITAS E CRASTO, 2012), o desempenho estrutural do sistema depende diretamente de fatores como: (a) a configuração dos painéis (quantidade e tamanho das aberturas, altura e largura do painel); (b) a resistência dos montantes; (c) a resistência e espessura das placas (OSB, gesso acartonado, cimentícia) utilizadas; (d) o tipo, quantidade e disposição dos parafusos de fixação das placas na estrutura.

Segundo o American Wood Council (2001), as paredes do sistema LWF devem ser protegidas do vento e da infiltração de água através de materiais repelentes (manta ou membrana de polietileno de alta densidade) que impeçam a passagem de água para o interior dos painéis de vedação, garantindo a estanqueidade das paredes. Contudo, devem permitir a

passagem da umidade da parte interna dos painéis para o ambiente externo, de forma a evitar a condensação no interior dos painéis. Assim, entre as placas de OSB e as placas de revestimento externo é aplicada membrana para evitar que a água da chuva e a umidade interna penetrem na parede, protegendo a estrutura.

As membranas hidrófugas devem revestir toda a área externa das placas OSB e ser aplicadas em torno de todas as aberturas nas paredes (AWC, 2001). Essas mantas são fixadas nas placas através de grampos, e sobrepostas de 15 a 30 centímetros em suas juntas para criar uma superfície contínua e efetiva que evite infiltrações de água (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012). As bordas inferiores das placas devem ficar a uma distância mínima de 15 centímetros acima do nível do piso externo, e prevista uma pingadeira metálica entre o desnível do contrapiso e a OSB (LPBRASIL, 2011).

As vedações verticais também têm papel fundamental no isolamento termo acústico das edificações, uma vez que constituem as barreiras físicas entre os ambientes internos e o meio externo. Nesses casos, são considerados os conceitos de isolamento multicamada, que consiste em combinar placas leves de fechamento afastadas, formando espaços vazios que são preenchidos por materiais isolantes (lã mineral, lã de vidro, etc.).

3.5 Componentes do sistema LWF

3.5.1 Perfis de Madeira

Conforme descrito anteriormente, a estrutura do sistema LWF é formada por quadros estruturais que servem como uma base para os materiais de vedação e é composta por perfis leves de madeira de reflorestamento, como o pinus. A madeira a ser utilizada deve ser seca, aparelhada, livre de grandes nós e receber tratamento preservativo ao ataque de insetos xilófagos (LPBRASIL, 2011). Os montantes e as guias utilizados em construções convencionais, geralmente, são definidos por seções transversais padrão (Tabela 4).

Tabela 4 - Variações de seção transversal dos perfis de madeira no sistema LWF

Seção transversal (mm)	Aplicação
38 x 89	Montantes e guias
38 x 120	
38 x 140	Vergas e contra-vergas
38 x 190	

Fonte: adaptado de LPBrasil (2011).

As dimensões de comprimento e largura das peças de madeira serrada devem ser especificadas o mais próximo possível das dimensões de uso. Conforme a ABNT (1991), a largura nominal das peças deve ser definida em múltiplos de 2,5 a 3 centímetros e o comprimento nominal deve ser definido em múltiplos de 300 centímetros (a partir de 180 cm até 420 cm). Segundo a norma, a espessura nominal das peças deve corresponder aos valores de 12, 14, 16, 19, 25, 32, 38, 50, 75 e 100 centímetros. Dimensões diferentes das citadas devem ser consideradas medidas especiais (ABNT, 1991).

Segundo o American Wood Council (2001), as guias inferiores devem apresentar uma única peça de seção transversal igual à do montante e devem ser ancoradas diretamente na fundação. Já para as guias superiores, é indicado o uso de peças duplas com a função de travamento dos quadros estruturais e maior rigidez à flexão (AWC, 2001).

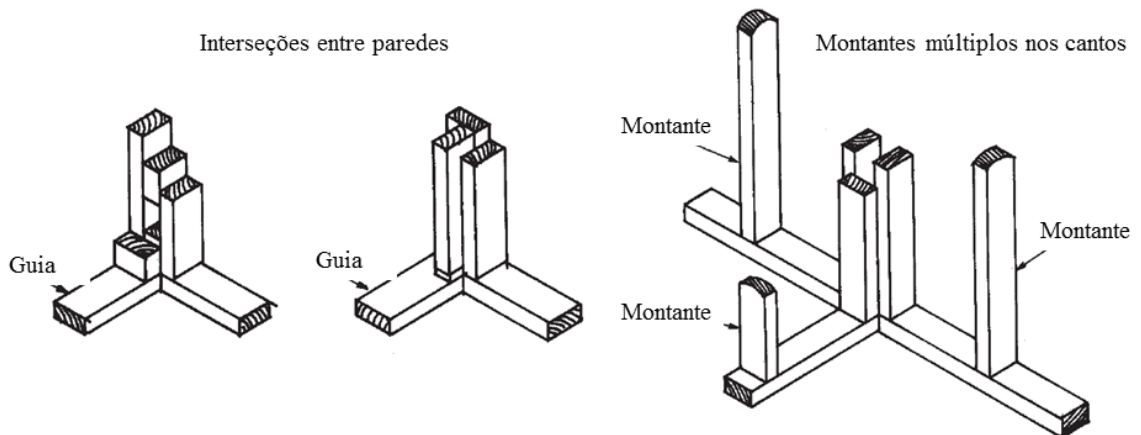
Geralmente, adota-se a distância de 40 centímetros para o espaçamento entre os eixos dos montantes em edificações de até dois pavimentos, conforme o *American Wood Council* (2011). Nas construções térreas é possível utilizar espaçamentos de até 60 centímetros entre os eixos dos montantes (AWC, 2001), de forma que sigam sempre dimensões múltiplas das placas de vedação a serem utilizadas. Em edificações a partir de três pavimentos o espaçamento entre montantes não deve exceder 40 centímetros (AWC, 2001).

As ligações entre os montantes e demais componentes (placas de vedação, revestimentos e esquadrias) são realizadas por meio de pregos, parafusos auto atarraxantes (LPBRASIL, 2011) ou conectores metálicos (AWC, 2001), com tratamento antioxidante (galvanizado ou *fendcoat*). As ligações entre os elementos estruturais e a fundação, conforme descrito anteriormente, devem ser realizadas por meio de ancoragens, empregando chumbadores químicos ou mecânicos (LPBRASIL, 2011).

Os cantos da edificação e as interseções dos painéis de vedação exigem arranjos especiais dos montantes de modo a propiciar a amarração eficiente das paredes e assegurar superfícies para pregação dos painéis externos e internos (Figura 6). Desta forma, todos os

cantos e interseções formam apoios para a fixação dos fechamentos internos e externos, por intermédio da união de vários montantes. As amarrações nos cantos dos quadros estruturais também auxiliam na resistência à tendência de giro causada pelas cargas laterais que incidem na edificação (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012).

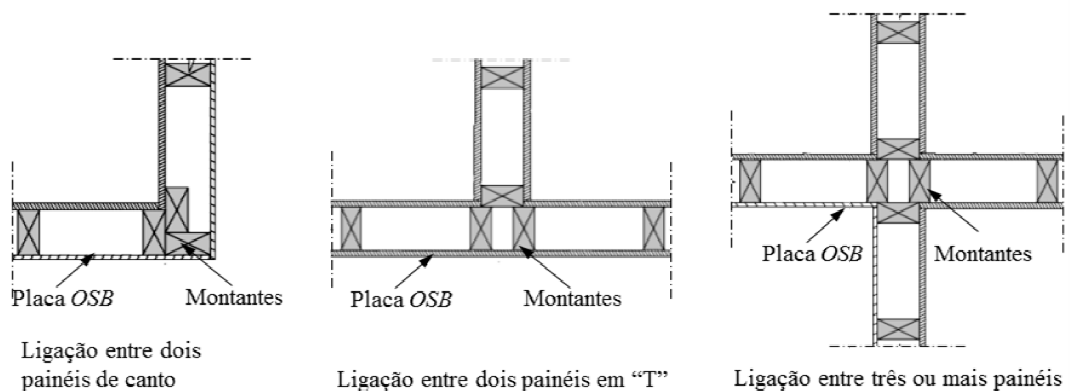
Figura 6 - Arranjos especiais de montantes nas interseções das paredes



Fonte: adaptado de *American Wood Council* (2001).

Conforme descrito por Santiago, Freitas e Crasto (2012), os tipos de ligações variam conforme o número de painéis que se unem, e o ângulo entre eles (Figura 7): (a) ligação entre dois painéis de canto (a guia superior de um dos painéis deve ser mais longa do que o comprimento da parede para que seja fixada sobre a guia superior do outro painel, aumentando a rigidez do conjunto); (b) ligação entre dois painéis em “T” (a extremidade de um painel é conectada perpendicularmente a outro painel); (c) ligação entre três painéis (as extremidades de dois painéis são conectadas a outro painel perpendicular, gerando uma união cruzada).

Figura 7 - Ligações entre painéis de vedação no sistema LWF

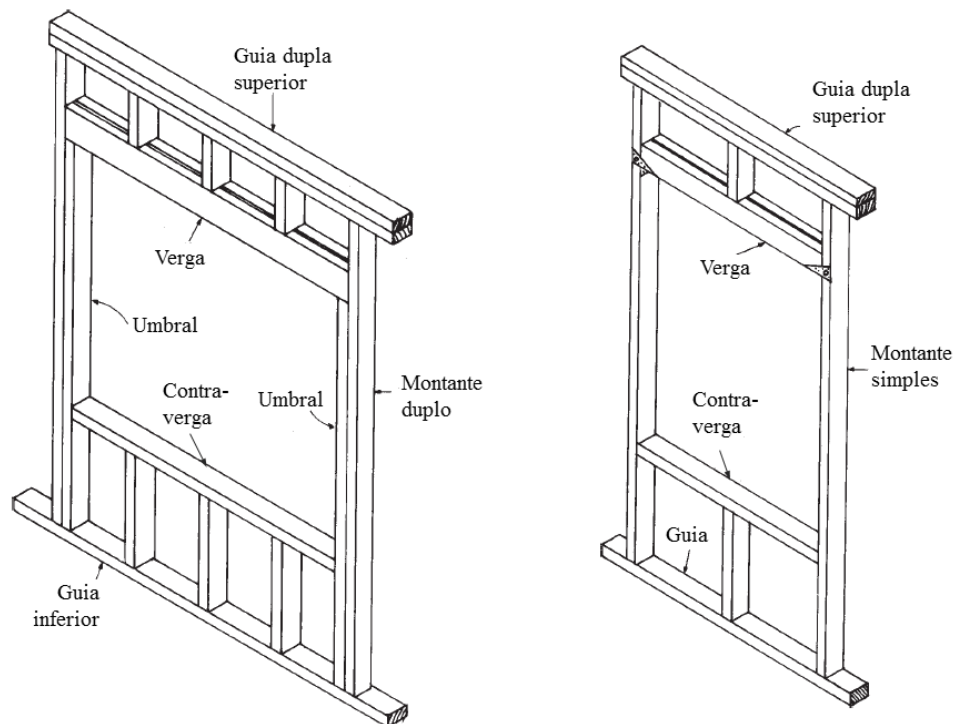


Fonte: adaptado de Arauco (2002).

Nas aberturas de portas e janelas, são utilizados elementos especiais, tais como vergas, umbrais e contravergas. Os umbrais são peças idênticas aos montantes, porém de comprimento limitado ao nível das vergas e contravergas, e funcionam como um apoio para as vergas. Os montantes onde são fixadas os umbrais são denominados montantes auxiliares.

Segundo o *American Wood Council* (2001), para aberturas nas paredes externas com até 90 centímetros é permitida a fixação das vergas diretamente no montante com o uso de presilhas metálicas. Nas aberturas de até 180 centímetros é recomendado o uso de umbral único fixado junto ao montante, servindo de apoio direto às vergas. Já para aberturas superiores a 180 centímetros, devem ser utilizados umbrais duplos fixados junto ao montante, permitindo assim o apoio de dois umbrais para as vergas. Portanto, quanto maior o vão a ser ocupado pela esquadria, maior o acúmulo de montantes laterais à abertura e mais alta a verga. As contravergas das janelas são peças únicas, geralmente de seção transversal igual à dos montantes (Figura 8).

Figura 8 - Estrutura dos vãos nos painéis com aberturas



Fonte: adaptado de *American Wood Council* (2001).

No caso dos painéis não estruturais, é possível utilizar seções dos perfis de montantes e guias com menores dimensões (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012). Além disso, segundo Santiago, Freitas e Crasto (2012), para as aberturas de portas e janelas não é

necessária a utilização de vergas e umbrais, uma vez que esses painéis não suportam cargas verticais. Nesses casos, é previsto um montante único para fixação do marco da abertura, podendo optar-se por colocar montantes duplos nessa posição para maior rigidez (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012).

3.5.2 Placas OSB (Oriented Strand Board)

No sistema LWF, a principal função do OSB é contraventar e vedar a estrutura de paredes, entrepisos, forros e substrato para cobertura de telhados, dispensando o uso outros elementos de resistência aos esforços solicitantes (LPBRASIL, 2011). Esse material permite a aplicação de diversos acabamentos, como *siding* vinílico, *siding* de madeira, *siding* cimentício, revestimento argamassado (estuco) e placa cimentícia. Conforme a LPBrasil (2011), a OSB permite a aplicação de armários ou peças suspensas em qualquer ponto da parede, sem a necessidade de prever o mapeamento dos reforços (LPBRASIL, 2011).

Segundo a LPBrasil (2011), a OSB é uma placa estrutural composta por tiras de madeira (geralmente provenientes de reflorestamento) orientadas em três camadas perpendiculares, que são unidas por meio de resinas e prensadas sob altas temperaturas, aumentando a resistência mecânica e a rigidez do material. Contudo, essas placas não foram desenvolvidas para serem utilizadas sem revestimento (LPBRASIL, 2011), não devem ser expostas às intempéries, e necessitam de um acabamento impermeável para aplicação em áreas externas. No Brasil, as placas OSB são comercializadas nas dimensões apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Dimensões comerciais e aplicações das placas OSB no sistema LWF

Dimensões (cm)	Espessura (cm)	Peso (kg)	Aplicação
120 x 240	0,95	17,5	Paredes e coberturas
120 x 300		21,9	
120 x 240	1,11	20,4	Paredes e coberturas
120 x 300		25,6	
120 x 240	1,51	27,8	Paredes, coberturas, pisos e lajes secas
120 x 240	1,83	33,7	Pisos e lajes secas

Fonte: adaptado de LPBrasil (2011).

Para o uso estrutural eficiente das placas OSB, e o aproveitamento das suas propriedades de resistência mecânica e de estabilidade dimensional, devem ser seguidas as orientações dos manuais para construções LWF e dos fabricantes para instalação:

- Os painéis devem ser fixados diretamente sobre a estrutura, posicionados preferencialmente na vertical (LPBRASIL, 2011);
- Devem ser previstas juntas de dilatação entre as placas, devido às variações dimensionais ocasionadas pela temperatura e umidade do ar. As juntas devem ser dispostas sobre montantes, com distância de 3 milímetros entre as placas em todo o seu perímetro (LPBRASIL, 2011; SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012);
- A paginação dos painéis deve apresentar juntas desencontradas, para melhor travamento. Deve-se evitar que as juntas entre painéis coincidam com as quinas de aberturas e cantos (LPBRASIL, 2011);
- No encontro entre vértices de quatro placas não deve haver coincidência, dessa forma, as juntas verticais devem ser desencontradas (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012);
- Devem ser previstas juntas de movimentação entre as placas *OSB* quando as paredes apresentarem dimensões maiores que 24 metros (LPBRASIL, 2011);
- Nas aberturas dos painéis, as placas devem ser cortadas em forma de “C” para que suas extremidades não coincidam com os vértices das aberturas (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012; ARAUCO, 2002);
- No encontro de dois painéis que formam um canto, as placas devem ser colocadas de forma que uma delas seja sobreposta sobre o outro painel (LPBRASIL, 2011; CONSULSTEEL, 2002).

3.5.3 Placas de Gesso Acartonado

As placas de gesso acartonado não possuem função estrutural (LUCA *et al.*, 2006) e podem ser utilizadas predominantemente como divisórias internas ou como vedação interna em painéis no sistema LWF. Essas placas são fabricadas industrialmente a partir de uma mistura de gesso, água e aditivos e revestidas com lâminas de cartão em ambos os lados, que atribuem à placa resistência à tração e flexão, além da resistência à compressão do gesso. Os

materiais que compõem as placas de gesso acartonado não se comportam de maneira estável em meios submetidos à ação da umidade, não sendo indicada sua aplicação em áreas externas ou sujeitas a ação da umidade (LUCA *et al.*, 2006).

A configuração das placas de gesso acartonado permite derivações e composições para atender às necessidades de resistência a umidade e ao fogo, isolamento acústico, ou aplicação em grandes vãos (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012): (a) placa normal (ou *Standard*, para aplicação em paredes destinadas a áreas secas); (b) placa hidrófuga (ou placa verde, resistente à umidade, desenvolvida especialmente para utilização em paredes localizadas em áreas sujeitas a ação da umidade); (c) placa resistente ao fogo (ou placa rosa, para aplicação em áreas secas, com exigências especiais de resistência ao fogo). As dimensões nominais e tolerâncias para utilização das placas de gesso acartonado são especificadas por normas e são comercializadas no Brasil conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Dimensões comerciais e aplicações das placas de gesso acartonado no sistema LWF

Dimensões (cm)	Espessura (cm)	Aplicação
Máx. 120 x 360	0,95	Área interna. Paredes, forros e revestimentos.
Máx. 120 x 360	1,25	Área interna. Paredes, forros e revestimentos.
Máx. 120 x 360	1,50	Área interna e externa. Paredes, forros e revestimentos.

Fonte: adaptado de Luca *et al.* (2006).

Na união entre as placas é utilizado um sistema de tratamento de juntas que consiste na aplicação de massa de rejuntamento, aplicação de fita de papel reforçado sobre o eixo da junta, e impregnação com massa (LUCA *et al.*, 2006). O revestimento das placas pode ser aplicado diretamente sobre o cartão e é possível a execução de revestimento cerâmico de acordo com as especificações de instalação. As paredes acabadas apresentam uma superfície uniforme, monolítica e com flexibilidade para evitar trincas e fissuras do gesso. Para a aplicação adequada das placas de gesso acartonado em edificações no sistema LWF, devem ser seguidas as orientações dos manuais especializados e dos fabricantes para instalação:

- As placas de gesso devem ter 10 milímetros a menos de altura do que o pé-direito, sendo parafusadas encostadas no teto e com a folga na parte inferior em relação ao piso (SILVA; SILVA, 2004);
- Onde existem aberturas para instalação de esquadrias, as placas de gesso também são instaladas encostadas no teto e com a folga junto à abertura (SILVA; SILVA, 2004);
- Devem ser previstas juntas de movimentação entre as placas de gesso quando as paredes apresentarem dimensões maiores que 50 metros para evitar fissurações devido à movimentação higrotérmica (LUCA *et al.*, 2006).

3.5.4 Placas Cimentícias

A composição das placas cimentícias resulta de uma mistura de cimento, fibras de celulose (ou sintéticas), e agregados. Toda placa delgada constituída por cimento é definida como cimentícia (FREITAS; CRASTO, 2012). As placas apresentam baixo peso próprio (até 18 kg/m²) o que facilita o transporte e manuseio, dispensando o uso equipamentos de içamento. Podem receber a aplicação de qualquer tipo de acabamento sobre sua superfície, como pintura acrílica e revestimento cerâmico (BRASILIT, 2006; ETERNIT, 2005).

As placas cimentícias podem ser utilizadas como revestimento, tanto interno, quanto externo de painéis de vedação e de piso, sendo necessário um substrato de apoio que proporcione maior resistência à flexão nas placas (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012). Além disso, as placas cimentícias apresentam alta resistência à umidade e intempéries, sendo uma alternativa ao gesso para aplicação nas áreas molhadas e externas da edificação.

As dimensões das placas cimentícias comercializadas para aplicação em sistemas construtivos como o LWF variam conforme apresentado na Tabela 10. Contudo, para aplicação sobre placas OSB, é recomendado o uso de placas cimentícias com espessura de 8 milímetros, classe A3, obedecendo aos requisitos da NBR 15498:2007 - Placa Plana Cimentícia sem Amianto - Requisitos e Métodos de Ensaio.

Figura 10 - Dimensões comerciais e aplicações das placas cimentícias no sistema LWF

Dimensões (cm)	Espessura (cm)	Peso (kg)	Aplicação
120 x 200		24,4	Área interna.
120 x 240	0,6	29,4	Arremates, móveis, elementos decorativos, divisórias leves.
120 x 300		36,7	
120 x 200		32,6	Área interna.
120 x 240	0,8	39,2	Paredes em áreas secas e úmidas, <i>shafts</i> .
120 x 300		49,0	
120 x 200		40,8	Área interna e externa.
120 x 240	1,0	49,0	Paredes em áreas secas e úmidas.
120 x 300		61,2	
120 x 200		49,0	Área interna e externa.
120 x 240	1,2	58,8	Áreas que demandam maior desempenho técnico.
120 x 300		73,4	

* As dimensões reais das placas apresentam 3 mm a menos nas extremidades, em função da junta necessária entre as placas.

Fonte: adaptado de Eternit (2005).

A maior ocorrência de patologias nas placas cimentícias é decorrente de fissurações no corpo da placa e trincas em juntas e revestimentos (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012). Para evitar esse tipo de problema, é realizado o tratamento de juntas de dilatação (aparente ou invisível) para absorção das tensões ocasionadas pelas movimentações térmicas e higroscópicas. Dessa forma, devem ser observadas as orientações dos manuais especializados e dos fabricantes para instalação adequada das placas cimentícias em edificações no sistema LWF:

- As juntas devem ser previstas sobre montantes e apresentar espaçamento de 3 milímetros entre as placas (incluindo todo o seu perímetro), e entre as placas e as esquadrias (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012; ETERNIT, 2005);
- Devem ser utilizados parafusos galvanizados tipo auto atarraxantes que devem ser próprios para placas cimentícias (FABRÍCIO, 2008);
- Nas aberturas dos painéis, as placas devem ser cortadas em forma de “C” para que suas extremidades não coincidam com os vértices das aberturas (BRASILIT, 2006);

- A base das paredes deve receber tratamento de impermeabilização nas áreas molhadas da edificação, para evitar infiltração de umidade nas placas por capilaridade, ou passagem de água por baixo da parede (BRASILIT, 2006);
- Quando a vedação de ambas as faces do painel for realizada somente por placas cimentícias, as juntas da face interna e externa não devem coincidir no mesmo montante, para garantir a rigidez do sistema (ETERNIT, 2005).

3.6 Considerações finais sobre o capítulo

Este capítulo fez uma apresentação do sistema construtivo *Light Wood Frame* (LWF), a partir de uma introdução conceitual e funcional do sistema e da descrição de seus principais elementos. Foram abordados, principalmente, os subsistemas de vedação a descrição de seus elementos e componentes, que representam maior enfoque do sistema construtivo nesta pesquisa.

A construção LWF, por ser industrializada, possibilita alcançar níveis mínimos de perdas de material. Contudo, a racionalização depende do planejamento, que deve possibilitar a utilização dos materiais de forma a garantir o melhor aproveitamento, uma vez que se trata de componentes de alto valor agregado. Assim, na definição dos painéis de vedação do sistema, deve haver a preocupação em reduzir a perda de placas OSB e de revestimento (gesso acartonado e cimentícia), além de manter uma baixa variação de painéis a serem produzidos em fábrica, especialmente quando considerada a produção em massa.

Não foi possível encontrar na literatura, trabalhos de cunho científico que discutam soluções de projeto do produto que atendam as boas práticas de execução em termos de desempenho da edificação e que, ao mesmo tempo, sejam voltadas à redução das perdas de materiais que compõem os painéis.

4 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo apresenta o método de pesquisa aplicado no desenvolvimento do presente trabalho. Aborda inicialmente a estratégia e o delineamento da pesquisa, as variáveis e os constructos avaliados e, posteriormente, as fontes de evidência utilizadas.

4.1 Abordagem e Estratégia de Pesquisa

O trabalho trata da interposição de quatro temáticas com estrutura teórica consolidada (modularidade do produto, redução de perdas na construção civil, customização em massa e diretrizes relativas ao sistema construtivo LWF) para a geração de novos conhecimentos e um produto final que demonstre sua aplicabilidade: diretrizes de projeto para a redução de perdas no emprego do sistema construtivo LWF para habitações de interesse social. Nesse contexto, optou-se pela abordagem da pesquisa construtiva (*Constructive Research* ou *Design Science Research*¹¹) e o estudo de caso como estratégia para o desenvolvimento do trabalho.

A abordagem da pesquisa construtiva consiste no desenvolvimento de construções inovadoras, destinadas a solucionar problemas enfrentados no mundo real e contribuir para a teoria das disciplinas nas quais é aplicada. Um elemento essencial da abordagem construtiva é vincular o problema e sua solução ao conhecimento teórico acumulado. Além disso, devem ser demonstrados a inovação e o funcionamento da solução proposta (LUKKA, 2003). As etapas da pesquisa construtiva correspondem à: (a) compreensão; (b) desenvolvimento; e (c) validação.

Conforme descrito por Lukka (2003), as etapas citadas compreendem os seguintes passos: (a) encontrar um problema com relevância prática, além de potencial contribuição teórica; (b) obter conhecimento geral e profundo do tema; (c) desenvolver uma construção para a solução do problema; (d) implementar a solução, testando seu funcionamento; (e) refletir sobre a aplicabilidade da solução; e (f) identificar e analisar a contribuição teórica.

¹¹ Os termos *Constructive Research* e *Design Science Research* são entendidos nesse trabalho, conforme tradução, como pesquisa construtiva.

Este processo típico de pesquisa construtiva foi a base para o delineamento do presente trabalho. A estratégia de pesquisa adotada foi o estudo de caso. Este se constitui em um estudo empírico que investiga um fenômeno atual dentro do seu contexto real, no qual as fronteiras entre o fenômeno estudado e o contexto não são claramente definidas. O estudo de caso pode ser aplicado quando as questões propostas são do tipo “como” e “por que”, ou seja, questões explicativas em relação à série de eventos atuais, sobre os quais o pesquisador não tem controle (YIN, 2001).

Na presente pesquisa, o estudo de caso foi constituído por duas etapas sequenciais, realizadas durante o processo de desenvolvimento de projeto colaborativo com a participação de equipes multidisciplinares, em ambiente acadêmico, de uma habitação parte de um Empreendimento Habitacional de Interesse Social (EHIS), no âmbito do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV). Ao longo do processo de desenvolvimento deste projeto, a equipe procurava responder a seguinte questão de pesquisa: Como reduzir os custos na produção de habitações de interesse social, no âmbito do PMCMV, para o emprego do sistema construtivo LWF?

4.2 Delineamento da Pesquisa

O projeto do produto, objeto do presente estudo, foi desenvolvido no contexto de uma rede de pesquisas denominada *Zero Energy Mass Custom Home Brasil (ZEMCH Brasil)*, cujo objetivo é promover a colaboração entre academia e indústria para buscar soluções viáveis para a produção de habitações sustentáveis em países desenvolvidos e em desenvolvimento, considerando os aspectos ambientais, econômicos e sociais.

O grupo de pesquisa¹² responsável pelo projeto ZEMCH Brasil, dentro do qual foi desenvolvida esta dissertação, tem como objetivo o desenvolvimento, a produção e a avaliação de alternativas para habitações de interesse social. As propostas desenvolvidas são baseadas em um processo de projeto integrado e colaborativo, com uso da estratégia de customização em massa, e fundamentadas na eficiência energética, na apreensão de valor da

¹² Arquiteto e Urbanista, doutor em Arquitetura e Urbanismo com dezenove anos de experiência acadêmica e experiência nas áreas de Planejamento e Projetos da Edificação, Habitação e Processo de Projeto; Engenheira Civil, doutora em Engenharia Civil com dezessete anos de experiência acadêmica e experiência profissional nas áreas de Gestão da Produção, Padronização e Prototipagem; Arquiteto e urbanista doutor, com vinte e nove anos de experiência como docente e experiência profissional em Construção em Madeira e Habitação de Interesse Social; Arquiteta e Urbanista, mestranda de Arquitetura e Urbanismo com experiência acadêmica e experiência profissional em Planejamento e Projetos da Edificação. Arquiteta e Urbanista, mestranda de Arquitetura e Urbanismo.

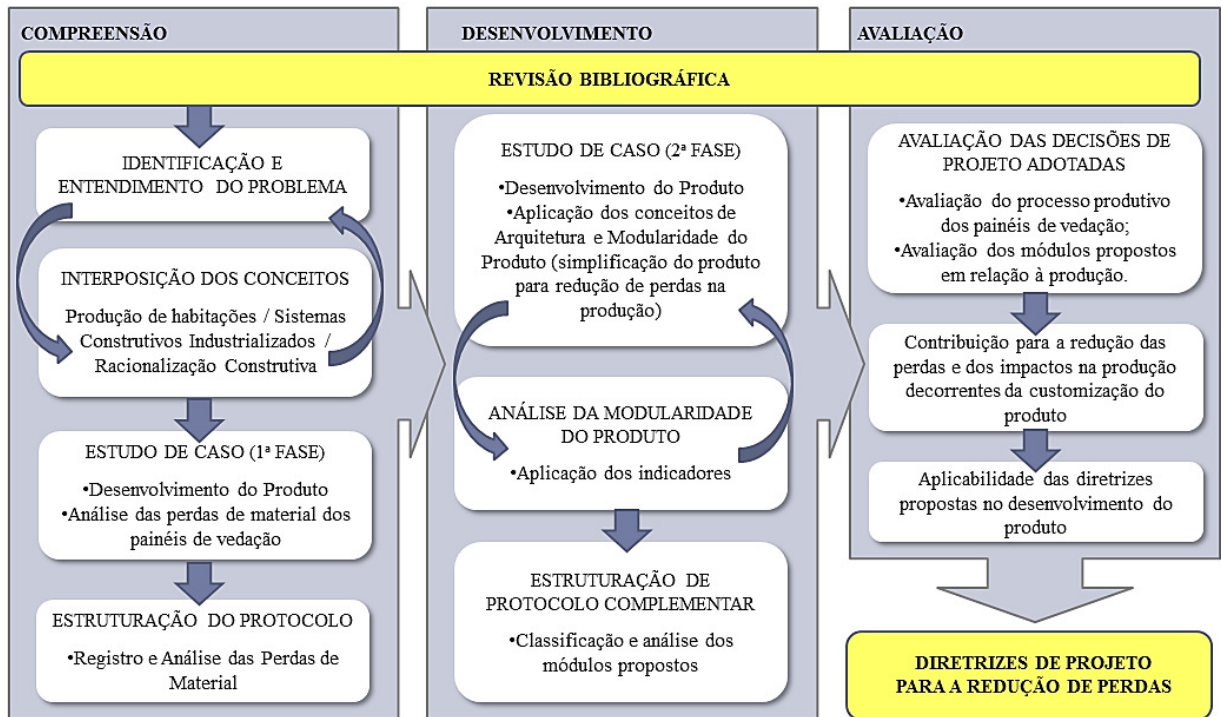
população de baixa renda a que se destinam e no atendimento às características do contexto brasileiro.

O projeto do produto habitacional foi desenvolvido porque adota tecnologias de construção industrializadas na produção de habitações de interesse social e a estratégia de customização em massa. A elaboração do projeto pelo grupo de pesquisa ZEMCH Brasil foi conduzida mediante a parceria com profissionais da “Empresa A”¹³, detentora da tecnologia de construção a seco adotada pela equipe de projeto.

A primeira fase do estudo, de caráter exploratório, teve como objetivo identificar problemas de projeto que acarretassem perda de materiais durante o processo produtivo. A segunda fase do estudo visou aplicação dos conceitos de modularidade no desenvolvimento do produto e a análise das soluções adotadas em relação às perdas de material e à simplificação do processo produtivo de unidades habitacionais de interesse social. A Figura 11 apresenta um resumo esquemático do delineamento da pesquisa e permite uma compreensão geral das etapas mencionadas, assim como do encadeamento das atividades desenvolvidas.

¹³ A “Empresa A” é uma empresa de engenharia que atua no mercado de construções habitacionais a partir de um sistema construtivo industrializado de painéis estruturais compostos por perfis de madeira e placas de vedação. A empresa desenvolveu uma tecnologia construtiva baseada no sistema *Light Wood Frame* e adaptada para as condições climáticas do Brasil. Em 2013, essa tecnologia foi homologada e aprovada no Ministério das Cidades e por bancos, como a Caixa Econômica Federal, para liberação de linhas de financiamento e seguro para empreendimento de habitações de interesse social no PMCMV. A empresa executou mais de 300 habitações nas regiões sul e sudeste do Brasil, dentre habitações de alto padrão e empreendimentos em larga escala.

Figura 11 - Representação gráfica do delineamento da pesquisa



Fonte: Elaborada pelo autor.

A etapa de compreensão envolveu a descoberta do problema inicial, considerando sua relevância prática e teórica; e um primeiro estudo, visando a obtenção de conhecimento e domínio dos principais temas relacionados. Assim, a pesquisa foi iniciada a partir de uma revisão bibliográfica inicial, sobre racionalização construtiva, industrialização e o emprego do sistema construtivo LWF para a produção de habitações, bem como da identificação de lacunas de pesquisas com base nos temas revisados.

A interposição das temáticas estudadas teve como objetivo a obtenção de conhecimento aprofundado sobre o tema, para o embasamento da construção da solução do problema identificado. Os estudos direcionaram o foco do trabalho para a inserção do conceito de Arquitetura e Modularidade do Produto no processo de desenvolvimento do produto para a simplificação e redução de perdas. A revisão bibliográfica estendeu-se ao longo do trabalho, com o objetivo de fornecer o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento da pesquisa.

Na etapa de compreensão foi realizada a primeira fase (exploratória) do estudo, no qual foi acompanhado o desenvolvimento do anteprojeto de uma habitação de interesse social, contemplando a aplicação de uma modulação de projeto conforme as dimensões dos componentes do sistema construtivo LWF. O acompanhamento dessa etapa do projeto do

produto possibilitou a identificação de problemas de projeto referentes à configuração dos painéis que resultava em perdas de material.

A análise dos resultados encontrados nessa etapa permitiu refinar os objetivos da pesquisa, que passou a ter como foco a aplicação dos conceitos de Arquitetura e Modularidade do Produto para simplificação do produto e da produção e redução de perdas no processo de desenvolvimento. A aplicação desses conceitos mostrou-se necessária uma vez que, para a redução de perdas decorrentes do processo produtivo em fábrica, são necessárias diretrizes que orientam a simplificação do produto.

Dessa forma, foi proposta a divisão dos painéis de vedação do produto em módulos que pudessem ser avaliados individualmente, com o objetivo de identificar possibilidades de padronização e repetição desses elementos. Assim, essa etapa contemplou as fases (i) e (ii) de uma pesquisa construtiva – encontrar um problema com relevância prática, e obter conhecimento geral e profundo do tema, respectivamente.

Na etapa de desenvolvimento da pesquisa, foi realizada a segunda fase do estudo de caso com a finalidade de estruturar as diretrizes de projeto para redução de perdas a partir da aplicação dos conceitos de Arquitetura do Produto e de indicadores para avaliação da Modularidade do Produto. A análise dos resultados encontrados nessa etapa da pesquisa permitiu refinar a configuração dos módulos propostos para a composição do produto, de modo a alcançar uma maior economia de escopo e potencializar a simplificação do processo produtivo.

Posteriormente à definição dos módulos dos painéis de vedação e a identificação das possibilidades de padronização e repetição dos elementos e suas implicações no projeto do produto, foram discutidas também as implicações dessas decisões no processo produtivo dos painéis. Essa discussão ocorreu durante a realização de um Seminário do Grupo de Pesquisa ZEMCH Brasil com a participação do Diretor de Engenharia de Produto da “Empresa A”. Nessa ocasião, foram apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento desta pesquisa até o momento, bem como os resultados de outras pesquisas em desenvolvimento pelo Grupo de Pesquisa do ZEMCH Brasil.

Com base nos dados apresentados, foram discutidas as experiências e métodos adotados pela “Empresa A” e levantada a necessidade de aproximação da pesquisa com o processo produtivo dos painéis na fábrica, bem como o processo de montagem dos mesmos na obra. Tendo em vista os apontamentos do representante da empresa e demais pesquisadores presentes, decidiu-se pela realização de uma etapa de avaliação das diretrizes

estruturadas a partir da compreensão do processo produtivo dos painéis e das implicações do projeto do produto no mesmo.

Assim, na terceira etapa foram avaliadas as decisões de projeto adotadas para modulação dos painéis de vedação, resultando na proposição das diretrizes de projeto, por meio da verificação das implicações no processo produtivo decorrentes das definições propostas para os módulos no projeto do produto. Para isso, foi analisado o processo produtivo dos painéis de vedação em visita técnica a uma fábrica que produz habitações em sistema construtivo tipo LWF. A análise do processo produtivo dos painéis teve como objetivo orientar a avaliação dos impactos das decisões de projeto do produto na produção dos elementos modulares.

Assim, para finalização dessa etapa, foram avaliadas as decisões de projeto propostas e analisada sua aplicabilidade. Ao final dessa etapa, são apresentadas as diretrizes de projeto derivadas dessa avaliação e discutida a sua contribuição teórica. As etapas de desenvolvimento e avaliação da pesquisa correspondem às fases (iii) e (iv) da pesquisa construtiva – desenvolver uma construção para a solução do problema e implementar uma solução avaliando seu funcionamento, respectivamente.

4.3 Variáveis e constructos

Para orientar o processo de pesquisa e avaliar as diretrizes de projeto do produto construídas ao longo da presente pesquisa, foram empregadas duas variáveis (perdas, formatos) e dois constructos (modularidade, complexidade do fluxo de produção), desdobrados em outras variáveis, que são descritos a seguir. As fontes de evidências identificadas para registrar as variáveis e os constructos empregados no presente trabalho são descritas no tópico 4.4.

A variável “perda de material” corresponde à porcentagem relativa ao desperdício de material dos componentes dos painéis de vedação (montantes, placas OSB, placas de gesso acartonado e placas cimentícias) empregados no desenvolvimento do produto. O emprego dessa variável teve como objetivo obter dados para avaliar e demonstrar, durante o desenvolvimento do produto, o impacto das decisões de projeto no aproveitamento dos materiais utilizados. A partir do acompanhamento das perdas de material foi possível identificar suas causas e, a partir destas, sugerir soluções para preveni-las. Assim, a análise da

variável “perdas” possibilitou identificar oportunidades de economia no consumo e de redução das perdas dos materiais empregados no desenvolvimento do produto.

A variável “variação de formatos” é referente às diferenças de formatos dos componentes de vedação e revestimento (placas OSB, de gesso acartonado e cimentícias) empregados no desenvolvimento dos painéis de vedação do produto habitacional. A consideração dessa variável teve como objetivo avaliar as variações nas dimensões das placas decorrentes da necessidade de recortes e seu impacto no consumo e nas perdas de material. Além disso, a identificação das diferentes dimensões de recortes que geram essas variações de formatos possibilitou definir configurações padrão de recorte para aplicação das placas, principalmente nos painéis com aberturas, de modo a possibilitar economias em escala no emprego dos componentes de vedação.

O constructo “modularidade” corresponde à arquitetura e modularidade do produto aplicados na avaliação do produto habitacional por meio de indicadores. A avaliação desse constructo teve como objetivo demonstrar a evolução no aproveitamento dos elementos modulares (painéis de vedação) propostos, bem como das interações entre esses elementos. Este constructo é desdobrado em duas variáveis que correspondem aos indicadores “matriz de combinação de módulo” e “matriz de interações de módulo”, propostos por Rocha, Formoso e Tzortzopoulos (2015) e apresentados no tópico 2.4.4. Por meio desses indicadores, foi possível quantificar o número de repetições de módulos no produto proposto e avaliar a possibilidade de reduzir a variação e aumentar o aproveitamento de módulos existentes. Assim, a análise dessas variáveis possibilitou identificar oportunidades de economias escopo para simplificação do processo produtivo.

O constructo “complexidade do fluxo de produção” está relacionado à avaliação do fluxo dos materiais na produção dos painéis de vedação na fábrica. A avaliação desse constructo tem como objetivo verificar se as decisões adotadas resultam em impactos no fluxo de produção dos painéis de vedação, como alterações de fluxo devido a diferenciações de módulos semelhantes (como o embutimento de instalações ou aplicação de placas de revestimento diferentes em módulos com as mesmas dimensões) e identificar possibilidades de simplificação do processo. Este constructo é desdobrado em três variáveis baseadas no mapeamento do ciclo básico de produção: (a) grau de interdependência de processos; e (b) grau de padronização das operações.

A variável “interdependência de processos” corresponde à relação direta entre o número total de atividades do fluxo de produção e o número total de dependências estabelecidas, baseada na proposta de San Martin (1999). Essa relação estabelece a divisão

entre as quantidades de atividades e de dependências de todo o mapeamento do ciclo básico de produção, de modo a possibilitar que os processos se tornem mais independentes uns dos outros (SAN MARTIN, 1999). Esse indicador é representado por uma expressão matemática dada pela fórmula:

$$GIP = 1 - \frac{NTD}{NTA}$$

Em que:

GIP = grau de interdependência dos processos;

NTD = número total de dependências no mapeamento do ciclo básico de produção;

NTA = número total de atividades de todos os fluxos no mapeamento do ciclo básico de produção.

O cálculo do indicador gera valores entre um e zero, sendo que valores de GIP próximos de um são relativos a um número menor de dependências em relação ao número total de atividades. Segundo San Martin (1999), esse indicador auxilia na verificação das características de simplificação e transparência dos processos.

A variável “padronização das operações” é medida por meio da análise das atividades operacionais dentro do fluxo de produção, baseada na proposta de San Martin (1999). Nessa análise, o número total das operações que são realizadas mais de uma vez é relacionado ao número total de operações exigidas no ciclo básico de produção (SAN MARTIN, 1999). Esse indicador é representado por uma expressão matemática dada pela fórmula:

$$GPO = \frac{NOR}{NTO}$$

Em que:

- GPO = grau de padronização de operações;
- NOR = número total de atividades dos operários exigidas pelos processos intrínsecos e constantes do ciclo básico de produção que se repetem;
- NTO = número total de atividades dos operários exigidas pelos processos intrínsecos e constantes do ciclo básico de produção.

Os valores para GPO obtidos variam entre zero e um, sendo que valores próximos de um indicam uma maior incidência de repetições de atividades dos operários (SAN MARTIN, 1999). Assim, quanto maior a incidência de repetições, maior o grau de padronização de operações estabelecido. Conforme San Martin (1999), esse indicador mede de forma direta o requisito de padronizar componentes e métodos de trabalho.

4.4 Fontes de evidências

Segundo Yin (2001), a convergência das informações de diferentes fontes de evidências aumenta a confiabilidade, a validade e a representatividade de uma pesquisa. Outro princípio que deve ser respeitado durante a coleta de dados, conforme o autor é a criação de um banco de dados que garanta a rastreabilidade das evidências. O alinhamento dessas evidências coletadas deve permitir que um observador externo perceba como as questões iniciais levam às conclusões finais do estudo, de modo a responder todas as questões a que se propõe a pesquisa (YIN, 2001). Assim, ao longo do desenvolvimento da pesquisa buscou-se empregar diferentes fontes de evidência, de modo a possibilitar uma triangulação dos dados, garantindo uma maior consistência nas análises e conclusões do trabalho.

4.4.1 Etapa de Compreensão

Na etapa de compreensão, a revisão bibliográfica foi realizada a partir da análise de documentos, que consistiu no emprego de manuais de boas práticas de projeto e execução de edificações construídas com o sistema construtivo LWF (*Details for conventional wood frame construction – 2001; Canadian wood frame house construction – 2013; Arauco - Ingeniería y Construcción en Madera*), para orientar as decisões de redução de perdas de materiais sem que as práticas que garantem o desempenho adequado fossem desprezadas (por exemplo, configuração das placas na região das aberturas). Conforme Yin (2001), esse tipo de evidência geralmente é utilizado com o objetivo de corroborar as informações obtidas por meio de outras fontes de evidência (YIN, 2001).

Nesta etapa, foi desenvolvida a fase exploratória do estudo de caso em que as variáveis referentes às perdas de material e às diferenças de formatos dos componentes foram avaliadas por meio da observação participante e de registros em arquivo. A observação

participante consiste na participação do pesquisador no contexto analisado influenciando o processo e compondo o objeto de pesquisa (YIN, 2001). O estudo de caso desta dissertação foi realizado simultaneamente ao desenvolvimento do projeto de unidades habitacionais de interesse social no âmbito do PMCMV, a partir da adoção do sistema LWF, pelo Grupo de Pesquisa ZEMCH Brasil, no qual a pesquisadora atuou como membro da equipe de projeto com foco na produção.

As decisões tomadas pela equipe ao longo do desenvolvimento do produto, bem como suas justificativas foram registradas em um caderno de registros da pesquisadora. Para obter e registrar os dados referentes às variáveis “perdas” e “formatos”, foi elaborado um protocolo para o levantamento e avaliação das perdas de material decorrentes das decisões de modulação do projeto do produto (Tabela 6).

Tabela 6 – Protocolo para quantificação das perdas de material

Componentes	Consumo			Perdas		
	Chapas inteiras	Volume Total (m ³)	Variações de Formato	Volume Aplicado (m ³)	Chapas inteiras	Volume Total (m ³)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os índices de perdas de materiais foram obtidos por meio do protocolo para registro de informações extraídas do projeto para cálculo das perdas, a partir da comparação do consumo real (placa inteira e volume total de material) com a quantidade realmente aplicada na composição dos painéis de vedação (volume aplicado). Foi calculado o índice de perda de material para cada tipo de componente dos painéis de vedação (perfis de madeira, placas OSB, placas cimentícias e placas de gesso). Além disso, foram observadas as variações de formato dos componentes com o propósito de propor soluções para a padronização desses formatos.

A quantificação das perdas é calculada a partir do volume de material que será consumido menos o volume de material realmente aplicado na composição dos painéis. Essa diferença é resultado, principalmente, das perdas de placas nas áreas de aberturas (portas e janelas) dos painéis e dos transpasses entre as placas de OSB e as placas cimentícias e placas de gesso acartonado. O volume resultante é convertido em um número correspondente a placas inteiras para permitir a visualização do consumo em unidades integrais. Esse volume

também em convertido em um valor percentual, que possibilita a comparação com diferentes situações e produtos.

Além do caderno de registros, foi criado um banco de dados de imagens e peças gráficas resultantes da modelagem tridimensional do produto, que auxiliaram no registro e na disseminação das decisões de projeto. Os próprios projetos do produto desenvolvido foram utilizados como base de documentação, uma vez que os dados para quantificação das perdas foram retirados dos mesmos. Segundo Yin (2001), as imagens tem a capacidade de aumentar o poder de comunicação das informações, além de representarem um importante registro das características do estudo de caso.

4.4.2 Etapa de Desenvolvimento

Na etapa de desenvolvimento foi dada continuidade ao acompanhamento do desenvolvimento do projeto da mesma habitação de interesse social, por meio da observação participante. Nessa etapa, a pesquisadora continuou como participante ativa no desenvolvimento do produto, com foco nas soluções de projeto e de simplificação da produção para a redução de perdas.

Para o estudo de caso, as decisões tomadas pela equipe ao longo do desenvolvimento do produto, bem como suas justificativas continuaram a ser registradas em um caderno de registros da pesquisadora. Esses registros foram realizados com o intuito de permitir a análise de novas decisões que viessem a contrariar aquelas já estabelecidas. A modelagem tridimensional, as imagens e peças gráficas resultantes do processo de desenvolvimento do produto nesta etapa continuaram a compor o banco de dados da pesquisa.

Na segunda fase do estudo de caso foi avaliado, por meio de indicadores, o constructo “modularidade”. Os indicadores utilizados correspondem à Matriz de Combinação de Módulo e à Matriz de Interações de Módulo, desenvolvidas por Rocha, Formoso e Tzortozopoulos (2015), como meio de medir o grau de utilização do módulo, avaliar e comparar as economias de escopo para diferentes soluções projeto e identificar a necessidade de melhorar as interfaces entre os módulos.

A matriz de combinação de módulo foi aplicada com o objetivo de demonstrar a utilização dos módulos nas variantes do produto desenvolvidas, de modo a possibilitar a avaliação do grau de utilização de cada módulo. Essa análise orientou o desenvolvimento do produto direcionado ao uso mais eficiente dos módulos, à simplificação do produto e a uma

maior economia de escopo. A matriz de interações de módulo foi aplicada com o objetivo de identificar a quantidade e as variações das interações entre os módulos que compõem o produto, permitindo melhorias nas interfaces entre os módulos.

As informações referentes ao projeto do produto foram transpostas para os indicadores, gerando evidências que foram cruzadas com as variáveis analisadas anteriormente. Dessa forma, foi possível garantir uma maior consistência nas análises de simplificação do produto e redução de perdas no processo produtivo.

Para auxiliar a visualização dos módulos criados durante o desenvolvimento do produto, foi elaborado um protocolo que consiste no registro e identificação desses módulos (Tabela 7). O protocolo consistiu em uma planilha para o registro de cada um dos módulos propostos no projeto do produto e que compõem os painéis de vedação vertical da habitação. A partir desse registro, buscou-se a caracterização de cada um dos módulos, de modo a identificar as características que influenciariam no potencial de aproveitamento dos módulos. Essas características consistem em variantes que podem impossibilitar a repetição dos módulos existentes e o aproveitamento de módulos semelhantes, consequentemente, impactando na economia de escopo na produção do produto.

As variantes do protocolo foram definidas como: (a) dimensões de largura e altura, para identificação de módulos com medidas em comum ou aproximadas; (b) tipos de interfaces, para identificação das variações de conexões presentes em cada módulo; (c) tipo de revestimento interno e externo, para identificação de diferenças no tipo de revestimento aplicado em módulos semelhantes; (d) tipos de instalações presentes em cada módulo, para identificação de módulos semelhantes com os mesmos tipos de instalações; (e) tipos de aberturas presentes em cada módulo, para identificação de configurações de estrutura semelhante entre os módulos.

Tabela 7 – Protocolo para registro e caracterização dos módulos extraídos do projeto do produto.

Identificação	Largura (cm)	Interfaces	Revestimento		Instalações	Aberturas		
			Gesso	Cimentícia		Tipo	Largura (cm)	Altura (cm)
Nome do módulo	Largura do módulo	Tipo de ligação entre os módulos	Gesso acartonado ou placa cimentícia	Gesso acartonado ou placa cimentícia	Elétrica, hidrossanitária	Janela, porta	Largura da abertura	Altura da abertura

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4.3 *Etapa de Avaliação*





Na terceira etapa, foram avaliadas as decisões de projeto adotadas para modulação dos painéis de vedação, por meio da verificação das implicações no processo produtivo decorrentes das definições propostas para os módulos no projeto do produto. Para isso, as fontes de evidências utilizadas foram a aplicação de entrevistas e a observação direta.

A observação direta teve como objetivo coletar dados sobre a tecnologia empregada na produção em fábrica de painéis do sistema LWF. Dessa forma, buscou-se levantar informações adicionais sobre o processo produtivo desses elementos que pudessem corroborar ou orientar a adequação das diretrizes de projeto do produto propostas. Na observação direta, foi avaliado o constructo “complexidade do fluxo de produção”, de modo a compreender os limites ou problemas referentes à produção dos painéis de vedação que pudessem impactar na aplicação das diretrizes propostas. Para mapeamento do processo produtivo observado e posterior análise dos dados coletados, foi utilizado o mapofluxograma.

O mapofluxograma é utilizado na documentação do desenvolvimento de um processo por meio de símbolos e gráficos, de modo a facilitar o entendimento dos processos apresentados e auxiliar na gestão das perdas e outros problemas que ocorrem entre as diferentes atividades produtivas (ISHIWATA, 1991 apud ALVES, 2000). Essa ferramenta permite indicar as diferentes atividades desempenhadas durante o processo produtivo e registrar o local onde as mesmas são desenvolvidas.

A utilização de uma simbologia específica para representação das atividades permite a locação dessas atividades em uma planta esquemática, permitindo a visualização da situação geral do processo (ISHIWATA, 1991 apud ALVES, 2000). A simbologia utilizada na elaboração do mapofluxograma do processo de produção dos painéis de vedação na fábrica apresentado na presente pesquisa foi adaptada de Alves (2000), que trata da análise processos, referente aos fluxos de materiais e mão de obra em canteiros de obra, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Simbologia adotada para elaboração do mapofluxograma desenvolvido na pesquisa.

Símbolos	Função
	Conversão: representa a alteração na forma ou substância do material em processamento
	Transporte: representa uma mudança na localização do material e indica sua direção
	Estoque: representa a paralisação do material aguardando para ser utilizado
	Inspeção: representa o momento em que o material é inspecionado, em termos qualitativos ou quantitativos

Fonte: adaptado de Alves (2000).

A elaboração do mapofluxograma ocorreu apenas uma vez para registro do processo e dos postos de trabalho da produção de painéis. Dessa forma, o mapofluxograma desenvolvido foi utilizado para fins de documentação e análise da forma como os processos se desenvolviam na fábrica e para simular possíveis melhorias baseadas nas diretrizes de projeto propostas na presente pesquisa, conforme as considerações de Ishiwata (1991, apud ALVES, 2000): (a) estudar o processo; (b) identificar em quais pontos ocorrem as perdas; (c) verificar a redefinição do processo a partir de uma sequência mais eficiente; (d) verificar a continuidade dos fluxos e a ocorrência de problemas no *layout* ou no sistema de transporte; e (e) analisar se as atividades desenvolvidas no processo são realmente necessárias e qual o resultado da supressão dessas atividades.

De forma complementar, foram aplicadas entrevistas estruturadas de modo a corroborar as informações coletadas durante a observação do processo produtivo dos painéis de vedação na fábrica. As entrevistas foram realizadas durante a visita técnica em fábrica detentora da tecnologia para produção dos painéis em sistema tipo LWF. Foram entrevistados os técnicos responsáveis pela engenharia de produto, pela engenharia de operações e pelos projetos de produção, de modo a permitir obter informações relacionadas a ocorrências excepcionais durante a produção que pudessem impactar no fluxo, resultando na perda de eficiência do processo.

5 RESULTADOS

O estudo de caso foi constituído por duas fases sequenciais, realizadas durante o processo de desenvolvimento do projeto de uma habitação parte de um Empreendimento Habitacional de Interesse Social (EHIS), no âmbito do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV). A primeira fase do estudo, de caráter exploratório, teve como objetivo identificar problemas de projeto na definição nos painéis de vedação no sistema LWF que acarretassem perda de materiais durante o processo produtivo. A segunda etapa do estudo visou aplicação dos conceitos de Arquitetura e Modularidade do Produto e análise das soluções adotadas em relação à simplificação do processo produtivo de unidades habitacionais de interesse social.

5.1 Estudo de caso – Primeira fase

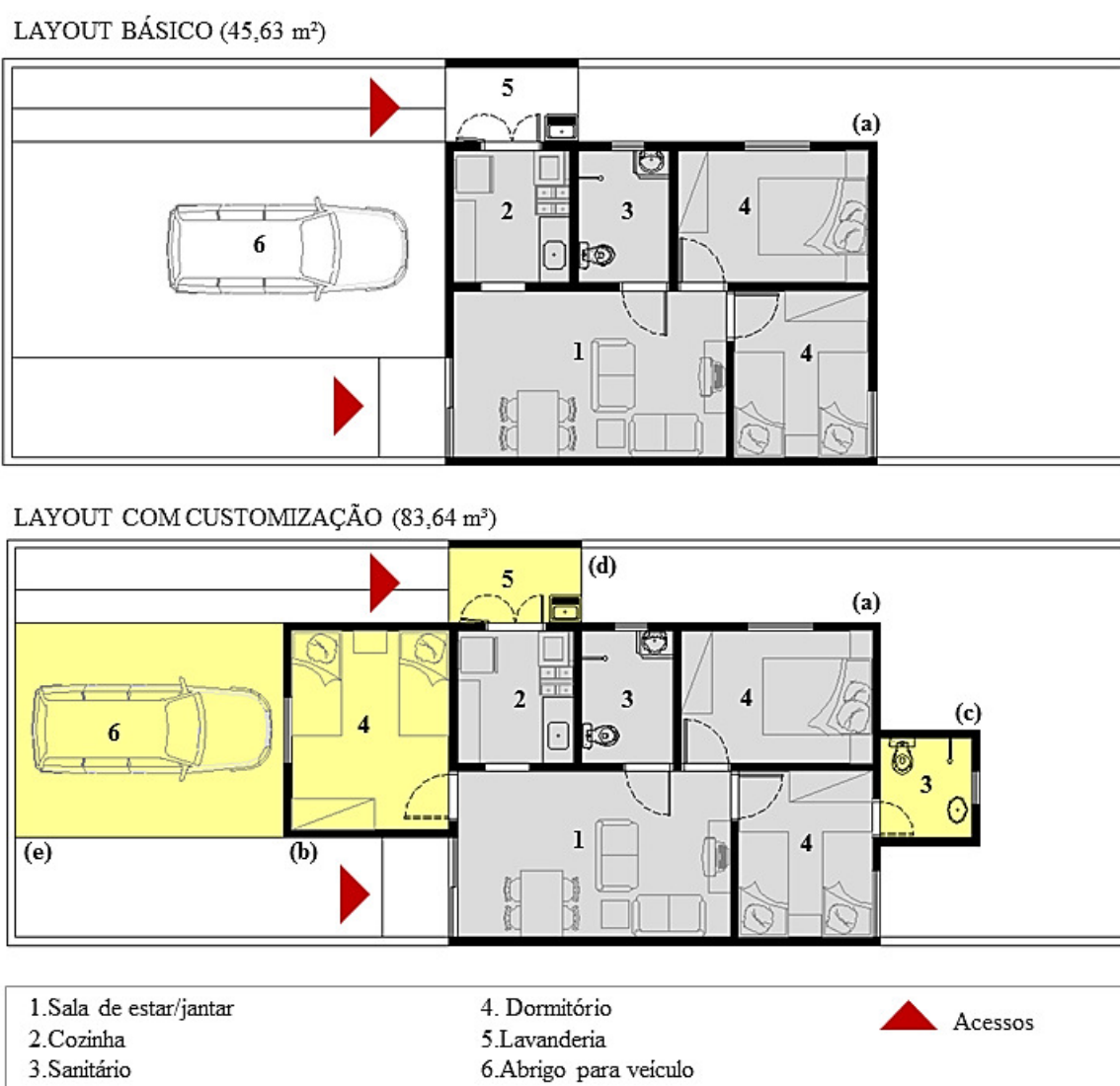
A primeira fase do estudo de caso (exploratória) foi realizada durante as etapas iniciais de desenvolvimento de um produto habitacional de interesse social no sistema LWF. Nesse estudo, a pesquisadora atuou como membro da equipe de projetos, a partir de contribuições com foco no processo produtivo da habitação. O objetivo da análise neste estudo foi registrar e quantificar o consumo e a utilização dos materiais que compõem os painéis de vedação do sistema, durante o desenvolvimento do projeto do produto. A análise desse levantamento permitiu identificar quantitativamente a incidência das causas das perdas dos materiais analisados para, a partir destas, sugerir soluções para evitá-las.

Os dados coletados referem-se à fase de anteprojeto do produto, quando foram realizadas reuniões entre a equipe de pesquisa do ZEMCH Brasil, antes do início do desenvolvimento dos projetos executivos. As ferramentas para coleta de dados do estudo de caso registraram o consumo e as perdas de material com base nas decisões tomadas pela equipe de projetos referentes à modulação dos painéis, de modo a propor estratégias para a redução de perdas de material.

O produto desenvolvido corresponde a uma habitação de interesse social no sistema LWF composta por um *layout* básico com área de 44,41 m² e quatro opções de ampliação para customização, resultando em uma área total máxima de 83,64 m² (Figura 13): (a) *layout* básico (dois quartos, sala, cozinha e sanitário); (b) adição de um quarto; (c) adição de um sanitário; (d) adição de cobertura na lavanderia; e (e) adição de cobertura na garagem.

O *layout* definido para a unidade habitacional desenvolvida atende a uma análise prévia de perfis e requisitos de clientes para a definição do programa de necessidades, realizada por uma equipe de pesquisadores em estudos anteriores ao presente trabalho. Os dados considerados nesta etapa são fonte secundária no presente trabalho, uma vez que foram coletados por membros do grupo de pesquisa ZEMCH em uma etapa de avaliação pós-ocupação do EHIS em estudo e serviram como fonte de dados para outras pesquisas além desta.

Figura 13 – *Layout* básico da habitação e opções de customização.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

5.1.1 Definição da modulação para desenvolvimento do produto

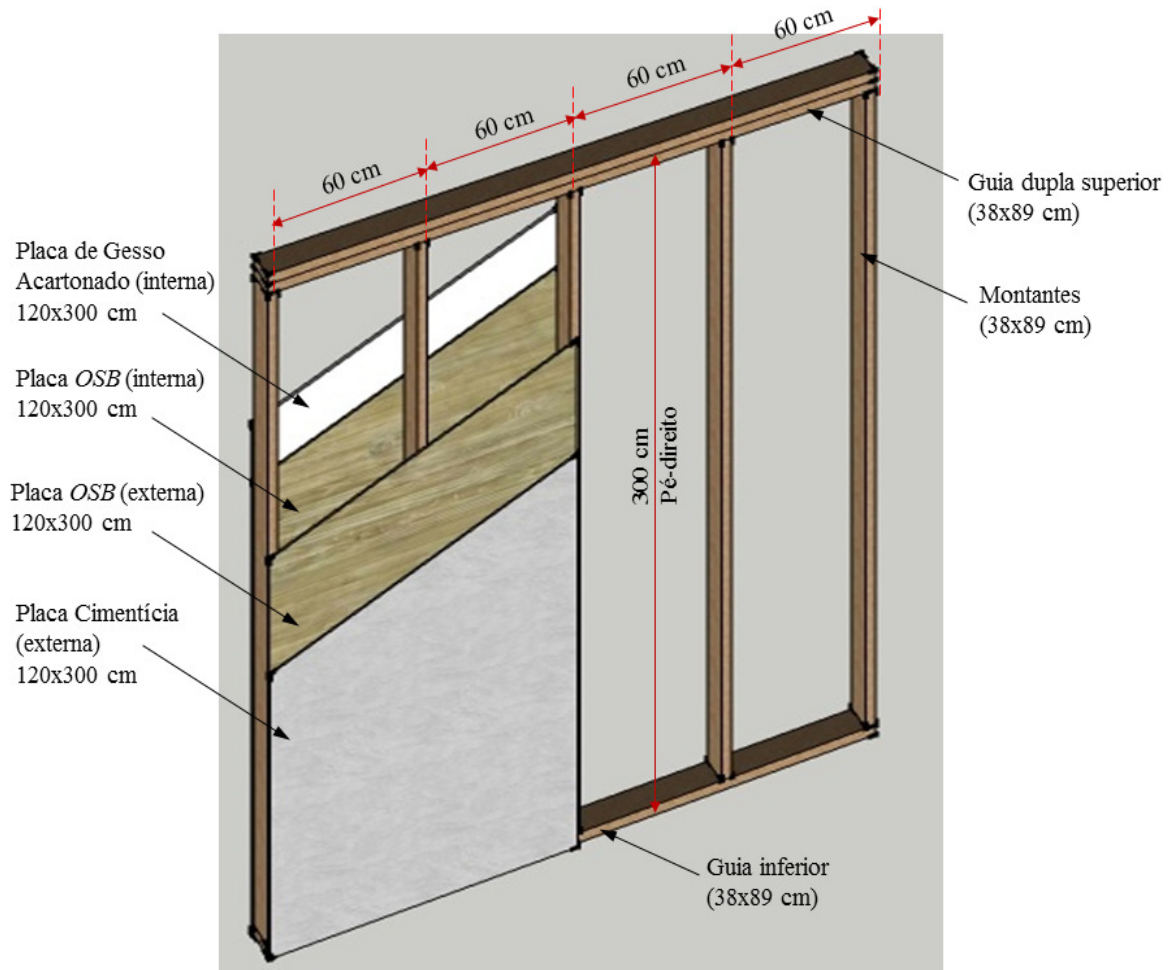
No desenvolvimento do estudo exploratório foi considerada a opção de *layout* que abrange todas as opções de customização da habitação. Dessa forma, a modulação dos ambientes internos e das paredes da habitação considera também as possíveis ampliações e alterações no produto.

A proposta da HIS adota a estrutura do sistema LWF com componentes de construção coordenados dimensionalmente. A utilização de um sistema industrializado tem como prerrogativa a concepção do produto com base nos princípios de coordenação modular. Contudo, o presente trabalho propôs a utilização de uma modulação derivada dos componentes construtivos do sistema LWF.

O foco desse estudo foram os painéis de vedação vertical e seus componentes modulares coordenados dimensionalmente para composição da habitação. Esses elementos verticais de fechamento (subsistema de vedação) delimitam os espaços internos da edificação, sendo diretamente afetados pela modulação. Além disso, correspondem à maior parte dos elementos e componentes construtivos e a maior área da edificação. Dessa forma, a sua definição e modulação, bem como a forma como serão fabricados e montados na obra, representam uma etapa crítica na definição do produto.

Os componentes dos painéis de vedação propostos atendem os critérios estruturais do sistema LWF. As edificações nesse sistema construtivo geralmente apresentam até três pavimentos, com espaçamento de 30 cm, 40 cm ou 60 cm entre os eixos dos perfis de madeira (montantes) que compõem a estrutura (AWC, 2001, SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012). As placas OSB são fixadas nos montantes provendo estabilidade e rigidez nos painéis. Para a HIS em estudo, adotou-se o espaçamento de 60 centímetros entre os eixos dos montantes por tratar-se de uma edificação térrea que permite a utilização do espaçamento máximo entre os perfis estruturais (Figura 14).

Figura 14 – Configuração dos elementos modulares do produto



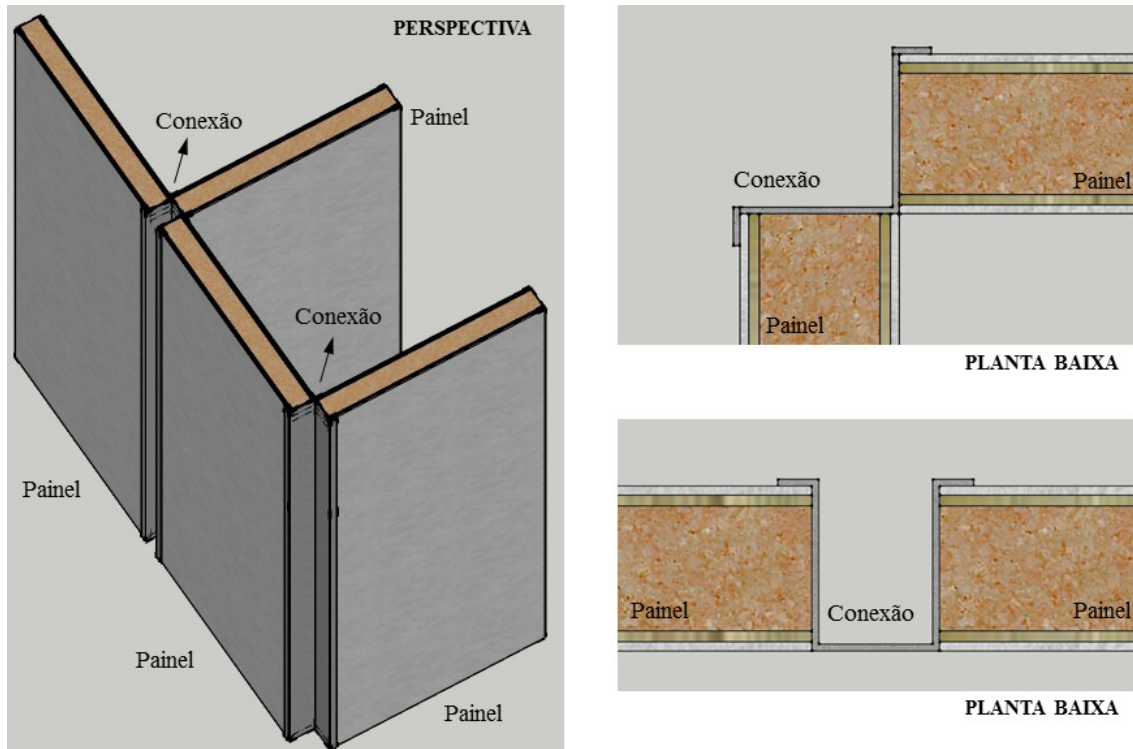
Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

O projeto do produto foi desenvolvido considerando a modulação dos painéis de acordo com as dimensões das placas de vedação. Dessa forma, as paredes apresentam dimensões múltiplas das dimensões das placas de vedação, que são aplicadas na orientação vertical (120 centímetros de largura por 300 centímetros de altura). A decisão de adotar dimensões de paredes múltiplas às dimensões das placas de vedação segue o conceito de modulação dos painéis, também compatível com a modulação estrutural.

Para evitar que os encontros de painéis causassem alterações na modulação definida, foram propostas conexões indiretas por intermédio de perfis metálicos. Isso ocorre porque nas ligações são acrescentadas as dimensões de espessuras dos painéis, alterando as dimensões finais de área de revestimento externo. O tipo de ligação proposta cria uma dissociação entre os painéis, e as espessuras deixam de influenciar na modulação de aplicação das placas (Figura 15). O objetivo dessa decisão foi conferir intercambiabilidade aos painéis e,

consequentemente, maior flexibilidade no desenvolvimento do produto e menor impacto das soluções de customização na produção.

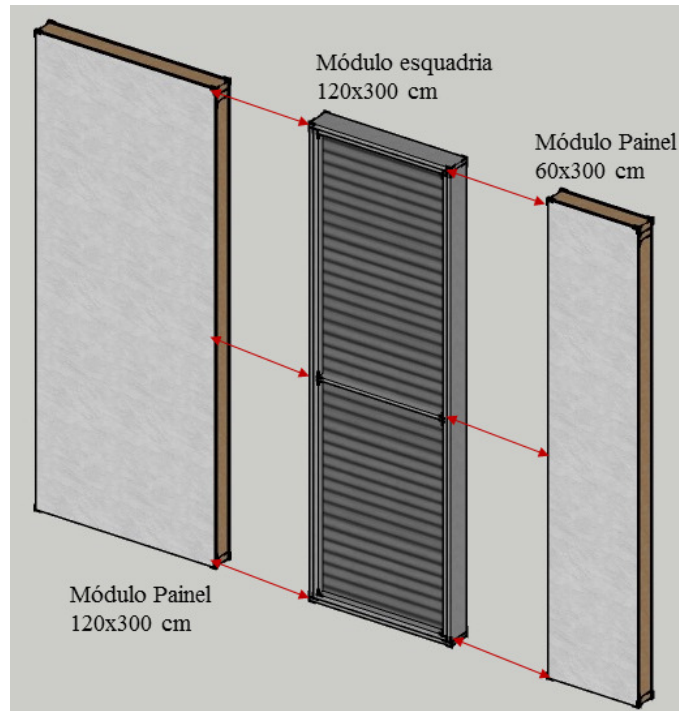
Figura 15 – Conexões entre os painéis



Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

Um ponto de atenção importante foi a configuração dos painéis com aberturas e instalação de esquadrias, uma vez que exigem o recorte das placas de vedação e acabamento. Como solução foram propostas esquadrias com as mesmas dimensões das placas, nas variações de 60 ou 120 centímetros de largura por 300 centímetros de altura. Dessa forma, as áreas de painel que compreendem aberturas para instalação de esquadrias foram substituídas pelas próprias esquadrias (Figura 16). A amarração desse sistema poderia ser realizada através da união dos perfis metálicos da esquadria com os perfis de madeira dos painéis, por ligações parafusadas.

Figura 16 – Painéis e esquadrias modulados.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

Essa decisão teve como propósito dois aspectos principais no desenvolvimento do projeto do produto que afetam diretamente a produção. O primeiro aspecto é referente à possibilidade de redução de custos a partir da maior rapidez e eficiência na pré-fabricação dos painéis, de modo a compensar o investimento adicional na personalização das esquadrias. O segundo aspecto corresponde à redução na quantidade de peças madeira utilizadas e de procedimentos realizados na produção dos painéis. Isso se deve à necessidade de reforços estruturais nas áreas com aberturas, que correspondem a uma série de pequenas peças, além de montantes e vergas extras, conforme as técnicas construtivas recomendadas para o emprego do sistema LWF.

Contudo, para adoção das propostas apresentadas de ligações indiretas entre os painéis através dos perfis metálicos e de criação de um painel de esquadria, seria necessário o desenvolvimento de uma técnica construtiva diferente da utilizada pelas empresas construtoras especializadas nesse sistema construtivo no Brasil. As práticas construtivas utilizadas por essas construtoras para produção de habitações em LWF foram reconhecidas e homologadas pelo Ministério das Cidades, por meio das Diretrizes para Avaliação Técnica de Produtos nº 005, referente aos Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira

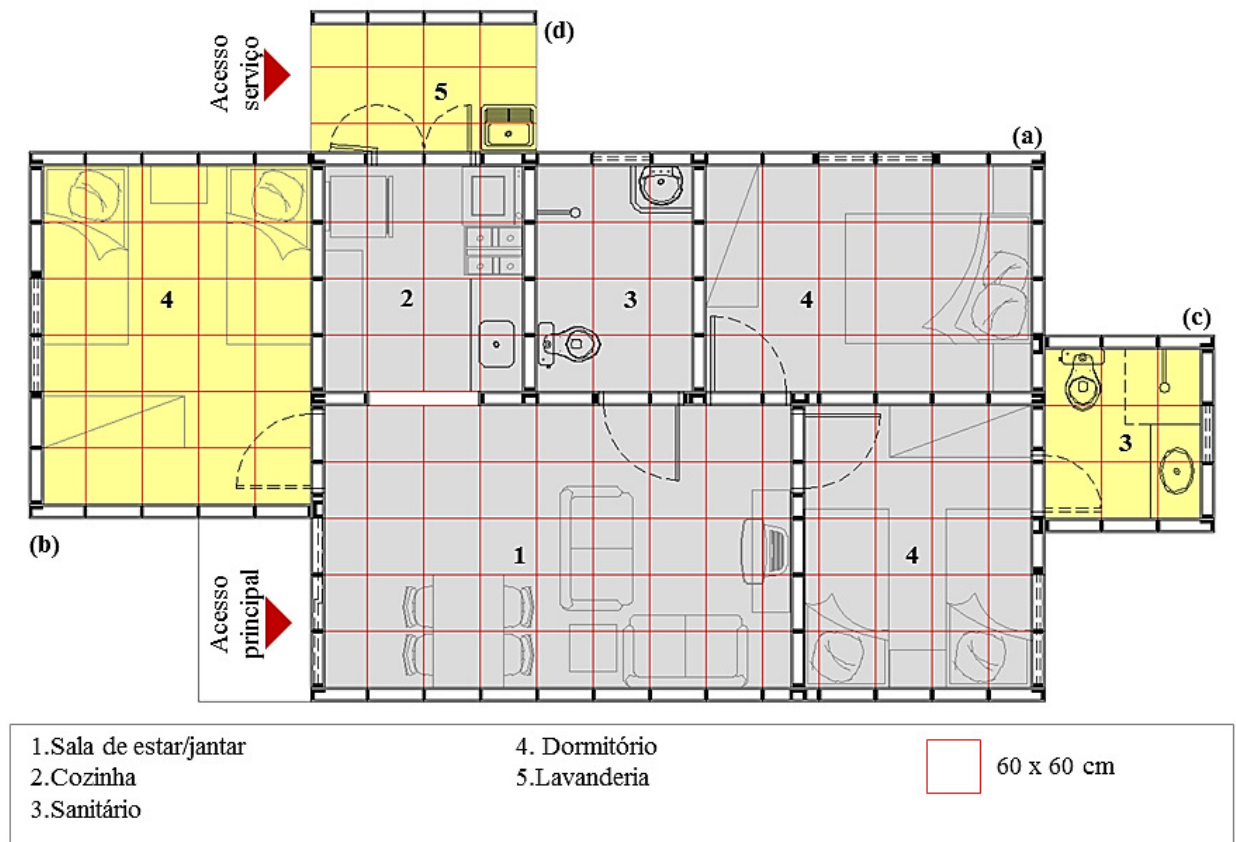
maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “*Light Wood Framing*”) (SINAT, 2011).

Dessa forma, qualquer técnica diferente que seja proposta necessita do reconhecimento para a viabilização de sua utilização na produção de habitações no país. Assim, há necessidade de verificação da viabilidade das soluções propostas anteriormente apresentadas. No contexto da presente pesquisa, essas propostas demandariam recursos humanos, materiais e financeiros para o seu reconhecimento, o que poderia inviabilizar a continuidade do projeto.

Assim, foi definida como diretriz a utilização da tecnologia conforme as práticas construtivas homologadas no Brasil para o emprego de sistemas tipo LWF na construção de habitações. Além disso, passou a ser adotada, no desenvolvimento do produto, a utilização de esquadrias convencionais e arranjos de montantes especiais para amarração das paredes e pregação dos painéis externos e internos, conforme os manuais consultados para construções em LWF.

A partir dessa diretriz, as áreas dos ambientes ficaram restritas à modulação das placas de vedação do sistema (Figura 17). Foi considerada a modulação de 60 centímetros para a composição e divisão dos espaços internos da edificação, respeitando as dimensões do lote (7,30 x 20,55 metros) e as exigências de recuos frontal (5 metros) e lateral (1,5 metros) da edificação em relação às divisas, assim como as áreas mínimas dos ambientes internos definidas pela legislação municipal.

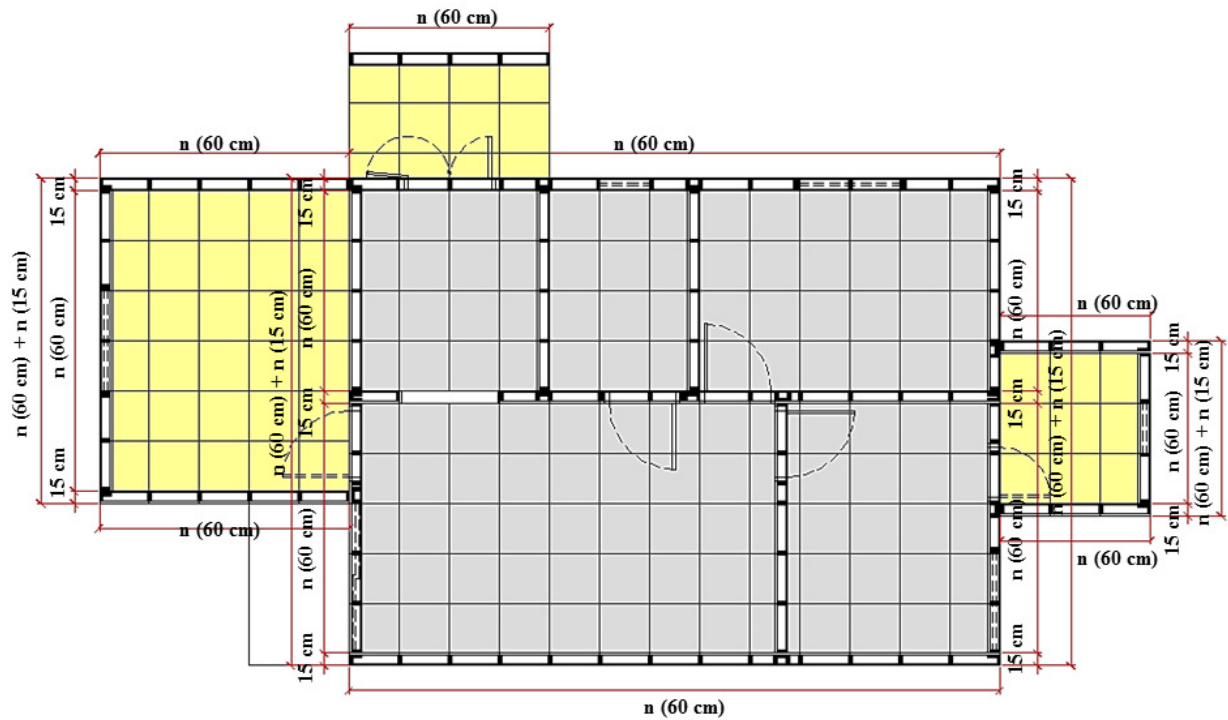
Figura 17 – Definição modulação a partir da malha nas áreas internas da habitação



Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

O módulo de 60 centímetros foi adotado para as dimensões das paredes internas da edificação. Assim, a extensão longitudinal das paredes externas resultou da soma do total de módulos utilizados e a extensão das paredes transversais resultou do total de módulos, somado à espessura das paredes longitudinais. Dessa forma, a extensão total das paredes longitudinais é igual a $n(60 \text{ cm})$ e das paredes transversais é igual a $n(60 \text{ cm}) + n(15 \text{ cm})$, em que n corresponde às repetições de módulo e às interseções com as paredes transversais.

Figura 18 – Dimensões das paredes externas



Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

Seguindo esse padrão, os perfis estruturais de madeira (38 x 89 centímetros) foram dispostos a cada 60 centímetros em função da dimensão da placa de 120 centímetros, para atender um espaçamento de 60 centímetros entre os eixos dos montantes. Os painéis acabados são compostos por perfis estruturais de madeira, fechamento em placas de OSB (nas faces externas e internas), e revestimento em placas cimentícias (nas faces externas) e placas de gesso acartonado (nas faces internas). Essa composição corresponde à caracterização prevista na Diretriz Normativa nº 005 do SINAT, referente a sistemas construtivos tipo LWF (SINAT, 2011) e aos padrões utilizados pelas empresas construtoras brasileiras que utilizam essa tecnologia.

Todos os painéis seguiram as dimensões das placas com variações de 120 centímetros e 60 centímetros de largura, e dimensão fixa de 300 centímetros de altura. A dimensão padrão de 300 centímetros de altura definiu o pé-direito da habitação com a mesma medida. Nesse caso, poderia ser adotado qualquer dimensão para o pé-direito da habitação, uma vez que se trata de um empreendimento com alta repetitividade, permitindo a fabricação de placas com alturas diferentes dos padrões comerciais disponíveis (240 e 300 cm).

Na composição dos painéis, é necessário prever um transpasse mínimo de 15 centímetros entre as placas de OSB e as placas cimentícias. Essas placas devem ter as juntas

desencontradas para proporcionar maior travamento no sistema (LPBRASIL, 2011). Contudo, a necessidade do transpasse cria um problema de modulação, uma vez que essa diferença de pelo menos 15 centímetros pode ser variável, e é descontada ou adicionada das placas cimentícias para fechamento do painel. Essa diferença não segue a modulação de 60 e 120 centímetros definida no projeto, o que resulta no recorte e perda de placas.

5.1.2 Identificação e quantificação das perdas de material no desenvolvimento do projeto de uma HIS em LWF

A modelagem virtual tridimensional do produto, a partir de todos os componentes dos painéis, evidenciou outro problema significativo do sistema referente ao alto índice de perdas. Os recortes das placas de vedação e revestimento dos painéis nas áreas com aberturas criam uma grande variedade de configurações de placas, uma vez que devido à necessidade do transpasse, os recortes necessários diferiam em cada uma das aberturas da habitação de acordo com o seu posicionamento.

A partir do protótipo virtual desenvolvido, foi possível quantificar placas inteiras e recortadas utilizadas, o que permitiu calcular o volume de perdas de material. Além disso, foi possível identificar e quantificar as variações de placas utilizadas para cada tipo de material. Na Tabela 8, são apresentados os quantitativos de consumo e perda (em destaque) para cada tipo de placa aplicada na composição dos painéis de vedação vertical.

Tabela 8 – Quantificação do consumo e das perdas de material

Componentes	Consumo				Perda		
	Placas inteiras	Volume total (m ³)	Variações de formato	Volume aplicado (m ³)	Placas inteiras	Volume total (m ³)	Perda total
Placa OSB (9,5x120x300 mm)	99	3,386	10	3,000	11	0,386	11%
Placa Cimentícia (8x120x300 mm)	41	1,181	18	1,040	5	0,141	12%
Placa de Gesso Acartonado (12,5x120x300 mm)	65	2,925	16	2,400	12	0,525	18%

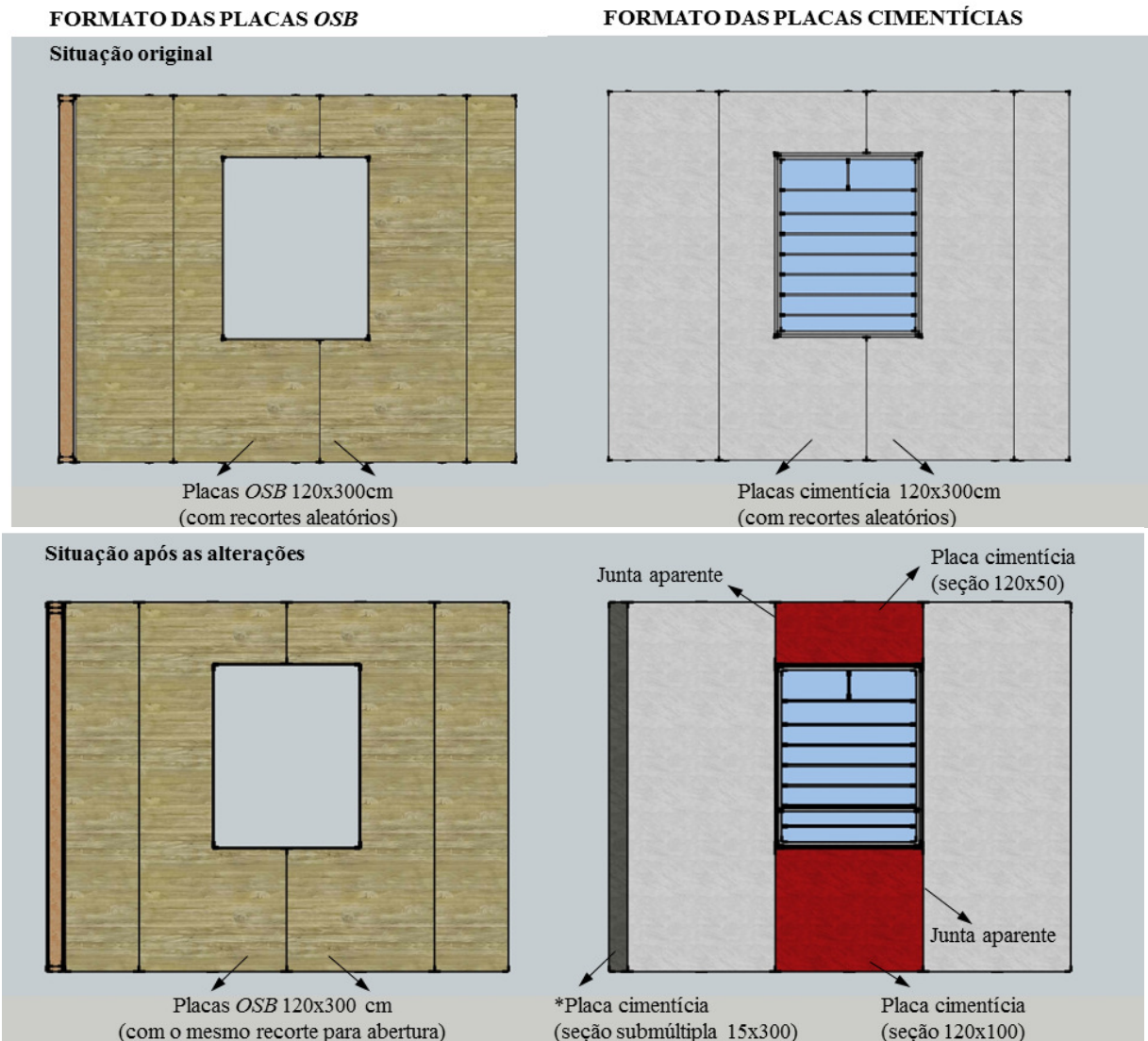
Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

Com base nesses resultados, foram identificadas oportunidades de economia por meio de uma revisão na modulação e sobreposição das camadas de revestimento dos painéis. Para reduzir a variação nas dimensões das placas aplicadas nos painéis com abertura, foi definida uma configuração padrão para a instalação das placas de revestimento externo (placas cimentícias) e interno (placas de gesso acartonado). Essa configuração padrão é particularmente importante quando considerada a economia em escala, uma vez que se trata de um empreendimento que compreende a produção de uma grande quantidade de habitações.

Como configuração padrão, as placas OSB com recorte em formato “C” apresentam as mesmas dimensões para aplicação em ambas as laterais das esquadrias. Assim, um único formato de placa OSB será utilizado em todas as aberturas com as mesmas dimensões. Para aplicação das placas de gesso e cimentícias nas áreas superiores e inferiores (peitoril) das esquadrias é necessário o recorte devido às aberturas no painel.

Nesse caso, a altura do peitoril da janela foi definida em 100 centímetros e a altura das janelas foi fixada em 150 centímetros, restando 50 centímetros de altura na área superior abertura. Dessa forma, é possível utilizar uma placa integral para revestir o peitoril e a área superior de duas aberturas, evitando a perda de material nessa situação. As soluções propostas (Figura 19) evitam o recorte aleatório e reduzem a variedade de formatos das placas.

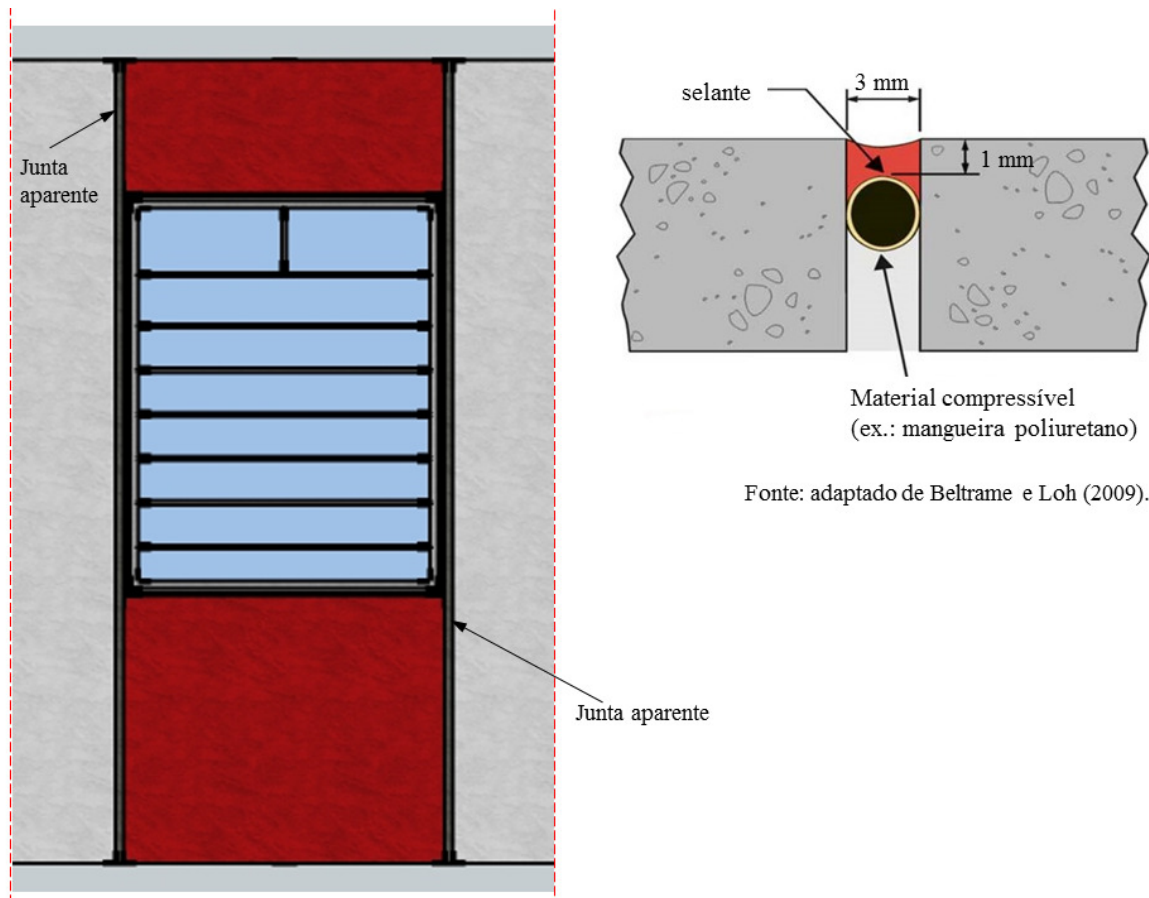
Figura 19 - Configuração padrão das placas de revestimento nos módulos com aberturas.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

As placas cimentícias e de gesso acartonado permanecem como as mesmas dimensões originais (120 x 300 cm) para aplicação nas laterais das esquadrias. No caso das placas cimentícias instaladas lateralmente às aberturas deve ser realizada uma junta aparente, conforme especificações técnicas do fabricante, para absorção das tensões ocasionadas pelas movimentações térmicas e higroscópicas (Figura 20).

Figura 20 – Vista e detalhe da junta aparente entre as placas cimentícias e as aberturas dos painéis



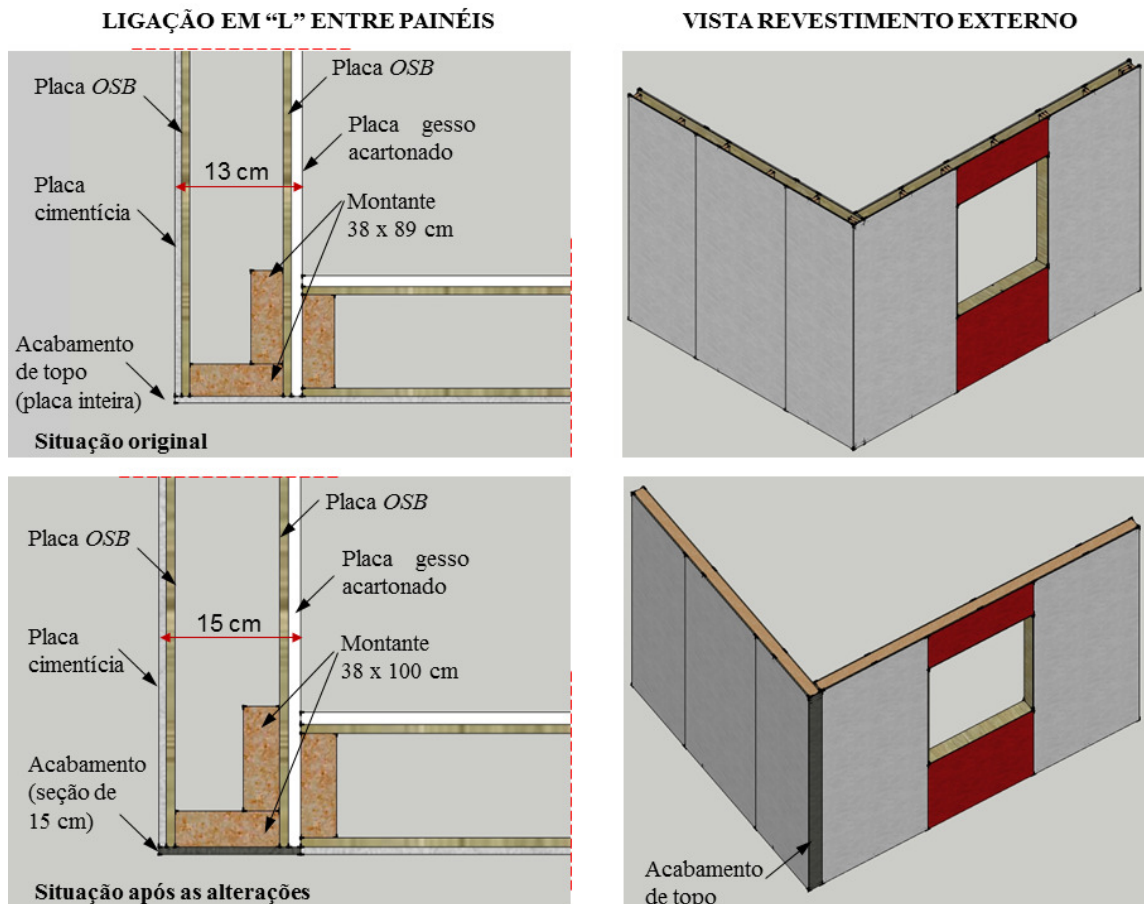
Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

Por meio da modelagem tridimensional, também foi possível identificar que a espessura dos painéis causa impactos nas perdas de material. Isso se deve às ligações em “L” entre os painéis, uma vez que a espessura do painel será somada a dimensão total da parede e essa espessura não foi inicialmente definida conforme a modulação proposta para os painéis de vedação. Esse ajuste foi realizado a partir do aumento da seção transversal dos montantes (inicialmente com 3,8 x 8,9) para 3,8 x 10 centímetros.

O aumento da seção transversal dos perfis aumentou o volume de madeira consumida no sistema de 1,42 m³ para 1,70 m³. Isso representa perda de material, uma vez que é consumido para execução do produto, mas não agrega valor sob o enfoque de cliente. Assim, mostra-se necessário avaliar qual perda (de placas ou de madeira) é a menos maléfica para a situação em questão. Nesse caso, pode ser priorizada a redução de perdas do material de maior custo agregado.

Para o acabamento externo nas ligações em “L” entre os painéis, foi definida uma seção submúltipla de 15 x 300 centímetros da placa cimentícia, correspondente à espessura do painel acabado (15 cm) e à altura dos painéis de vedação (300 cm). Uma vez que existem oito ligações desse tipo no produto proposto, pode ser aproveitada integralmente uma placa cimentícia de 120 x 300 centímetros nessa solução, evitando perdas devido à necessidade de recortes. O arremate das faces externas dos painéis demanda a realização de pré-furos na placa cimentícia para posterior montagem dos painéis no local da obra. Isso se deve ao risco de trincamento das placas cimentícias durante a fixação dos parafusos entre os painéis. Outra solução, para evitar a necessidade de execução dos pré-furos, é a instalação das seções de placa cimentícia no local da obra, após a montagem dos painéis de vedação (Figura 21).

Figura 21 – Ligações de canto e acabamento dos painéis

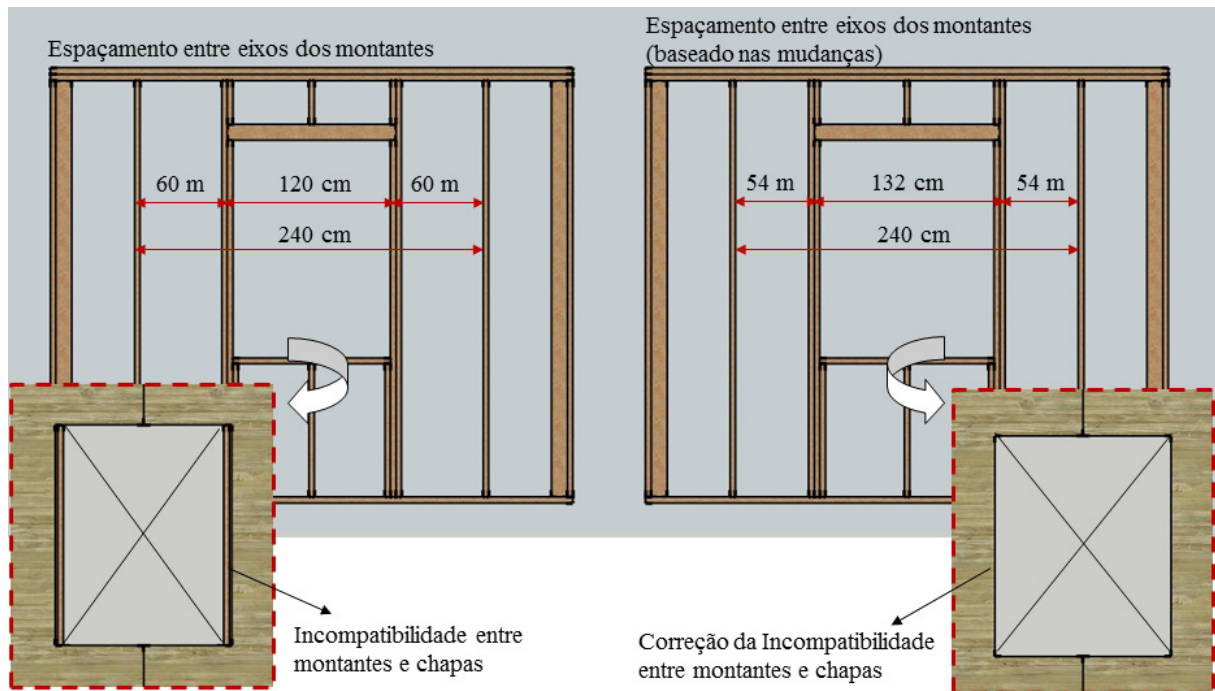


Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

A partir da aplicação das soluções propostas foi identificada uma incompatibilidade no posicionamento dos perfis estruturais em relação às placas de vedação, uma vez que os perfis ficariam aparentes nas áreas das aberturas. Para realizar o ajuste espacial, foram

necessárias alterações na posição dos perfis estruturais das aberturas (montantes, umbrais, composições inferiores e superiores) e nas dimensões dos perfis de apoio (vergas e contra vergas) para permitir o ajuste das placas dentro da modulação proposta (Figura 22). Para atender essa modulação, os vãos livres das aberturas ficam restritos às variações de 60 e 120 cm.

Figura 22 - Ajuste das dimensões dos componentes dos painéis.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

A partir das alterações de projeto propostas e a definição de uma configuração padrão para a instalação das placas de revestimento, foi realizado um novo levantamento quantitativo e análise do consumo e das perdas de material, como mostra a Tabela 9.

Tabela 9 - Quantificação do consumo e das perdas de material, com base nas alterações propostas

Componentes	Consumo			Perda			
	Placas inteiras	Volume total (m ³)	Variações de formato	Volume aplicado (m ³)	Placas inteiras	Volume total (m ³)	Perda total
Placa OSB (9,5x120x300 mm)	99	3,386	6	3,000	11	0,386	11%
Placa Cimentícia (8x120x300 mm)	37	1,066	8	1,040	1	0,026	2%
Placa de Gesso Acartonado (12,5x120x300 mm)	57	2,668	10	2,460	4	0,208	8%

Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

A partir dos resultados obtidos, foi possível observar que houve uma redução tanto do consumo, quanto das perdas de material referente às placas de vedação do sistema. Além disso, houve uma significativa redução nas variações de formato das placas. A redução das variações de formato mostra que houve uma menor necessidade de recorte nas placas e que há um maior aproveitamento das dimensões originais dos componentes, conforme apresentado a síntese dos resultados da Tabela 10.

Tabela 10 – Resumo dos resultados da quantificação da perda de material

Componentes	Perda de material				Perda de material (baseado nas alterações propostas)			
	Variações de formato	Placas inteiras	Volume total (m ³)	Perda total	Variações de formato	Placas inteiras	Volume total (m ³)	Perda total
Placa OSB (9,5x120x300 mm)	10	11	0,039	11%	6	11	0,386	11%
Placa Cimentícia (8x120x300 mm)	18	5	0,141	12%	8	1	0,026	2%
Placa de Gesso Acartonado (12,5x120x300 mm)	16	12	0,525	18%	10	4	0,208	8%

Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

A perda de material referente às placas cimentícias apresentou uma redução de 12% para 2%. No caso das placas de gesso essa redução foi de 18% para 8%. Em ambos os casos, houve a redução de dez pontos percentuais no volume de perda do material consumido para revestimento dos painéis de vedação da habitação. Isso mostra que as soluções adotadas

permitiram um melhor aproveitamento das placas, o que resultou em uma economia de material significativa para a produção de uma unidade habitacional.

Apesar ter sido adotada a mesma solução de configuração para as placas de gesso acartonado, o resultado referente à diminuição do desperdício mostrou-se inferior ao obtido para as placas cimentícias. Isso se deve às aberturas nas áreas internas da edificação para a instalação de portas para o acesso entre os ambientes, em que os painéis são revestidos por gesso acartonado em ambos os lados.

Dessa forma, a maior perda nas placas de gesso acartonado em relação às placas cimentícias deve-se a maior quantidade de aberturas nos painéis que possuem esse acabamento. No caso das placas OSB, a perda remanescente corresponde à necessidade de recorte nas placas nos painéis com aberturas.

Em relação às placas OSB, não houve redução do consumo nem das perdas. Contudo, foi identificada uma redução de quase 50% da quantidade de variações de formato dessas placas. Essa redução possibilita maior economia de escopo, uma vez que são necessárias menos atividades de corte das placas referente à mesma quantidade de material.

5.1.3 Síntese conclusiva da primeira fase do estudo de caso

A análise do consumo e das perdas de material durante o desenvolvimento do produto permitiu avaliar o impacto das decisões de projeto no aproveitamento dos materiais utilizados. Isso levou a equipe a rever decisões de projeto que resultariam em maiores perdas de material, sempre considerando a escala do empreendimento direcionada à produção em massa. A partir do acompanhamento do consumo e das perdas de material durante a fase de desenvolvimento do produto, foi possível identificar suas causas e, a partir destas, sugerir soluções para preveni-las, além de possibilitar a avaliação do impacto dessas decisões.

A perda remanescente nas placas OSB é resultante da recomendação técnica relativa à configuração das placas em formato “C” na região das aberturas. O percentual de perda identificado não é baixo quando comparado aos percentuais embutidos nos orçamentos para contemplar as perdas de materiais no sistema construtivo tradicional.

Por se tratar de um sistema construtivo industrializado, em que os materiais apresentam maior valor agregado, essas perdas representam impacto significativo no custo para produção em massa e não agregam valor ao produto. Deve-se buscar soluções técnicas

que eliminem essas perdas ou permitam o reaproveitamento desse material em outras partes do produto ou do empreendimento, de modo que agreguem valor ao produto final.

Assim, a quantificação do consumo e das perdas dos componentes dos painéis de vedação permitiu identificar potenciais áreas de melhoria e as principais causas de perda de material no produto proposto. Durante o desenvolvimento do projeto, o aproveitamento dos materiais aplicados deve ser observado e quantificado, de forma a potencializar a redução da variedade de tipos, do consumo e das perdas, devido a problemas de compatibilização dimensional. Em sequência, o estudo de caso principal visou complementar as soluções adotadas em relação às perdas de material a partir da aplicação dos conceitos de modularidade no desenvolvimento do produto, de modo a beneficiar a simplificação do processo produtivo de unidades habitacionais de interesse social.

5.2 Estudo de caso – Segunda fase

Os resultados da primeira fase do estudo de caso indicaram a necessidade de aplicar a padronização e a racionalização não apenas na formatação dos componentes do sistema, mas também na concepção dos painéis de vedação. Muitas medidas de racionalização da produção também dependem da fase de concepção do produto e podem causar maior impacto no custo, na velocidade e na qualidade dos empreendimentos (O'CONNOR; DAVIES, 1988). Dessa forma, devem ser concebidos painéis modulares que permitam o máximo aproveitamento de cada módulo, aumentando a modularidade do produto e simplificando o processo produtivo.

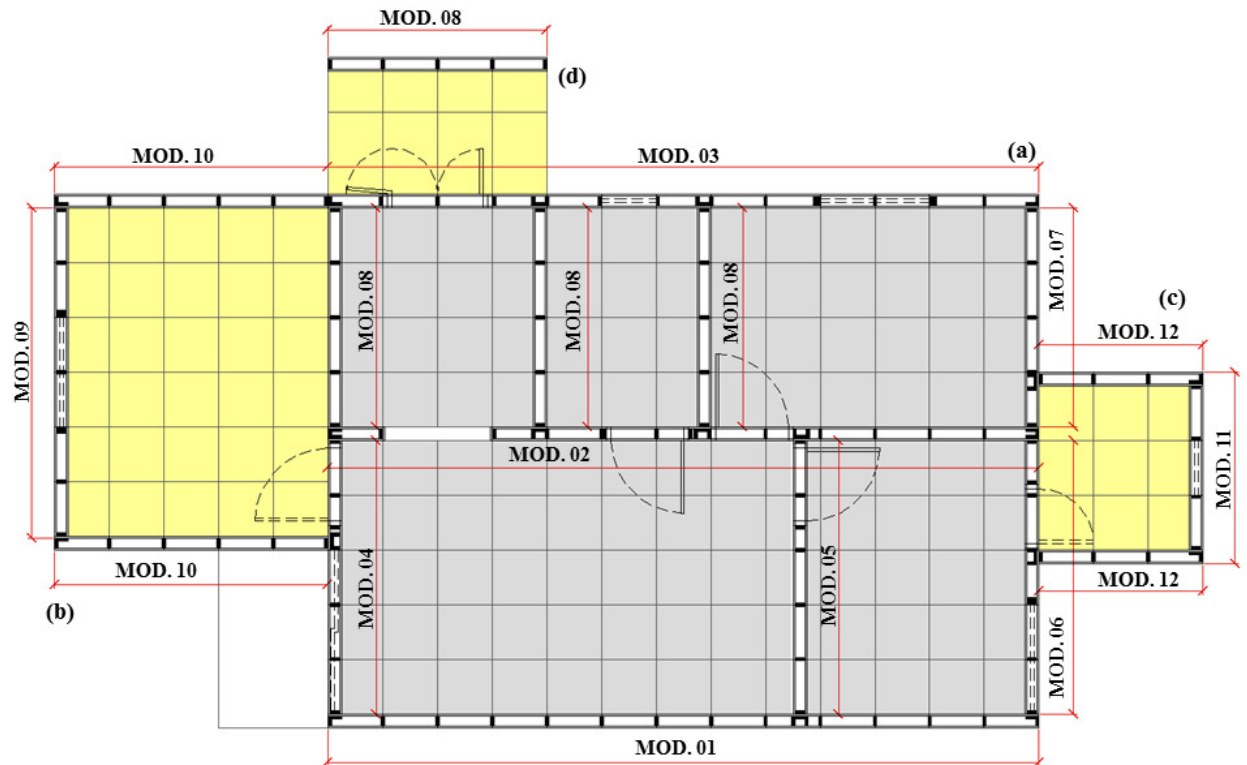
Na segunda fase do estudo de caso, a pesquisadora continuou como participante ativa no desenvolvimento do produto, com foco nas soluções de projeto e de produção para a redução de perdas. Essa etapa foi desenvolvida com a finalidade de estruturar as diretrizes de projeto para redução de perdas. A análise do produto foi realizada por meio da aplicação dos indicadores para avaliação da modularidade do produto e para avaliação da complexidade do produto e do processo de produção dos painéis.

5.2.1 Análise da Arquitetura e Modularidade do Produto

No presente estudo, a caracterização do módulo segue a abordagem de elementos modulares obtidos a partir da combinação de componentes (perfis de madeira, placas OSB, placas de gesso acartonado e placas cimentícias) e com dimensões múltiplas da modulação previamente definida no projeto do produto (60 centímetros), conforme a Figura 14. Os elementos modulares do produto habitacional correspondem aos painéis de vedação vertical. Nessa abordagem, os conceitos de arquitetura do produto se aplicam à perspectiva dos componentes, em que a modularidade é alcançada por meio da repetição desses elementos modulares. Essa abordagem é justificada uma vez que se considera que esses elementos serão produzidos em fábrica e, posteriormente, serão montados no local da obra para composição dos vazios espaciais, formando as variantes de produto selecionados.

As dimensões máximas dos painéis foram definidas considerando a capacidade do tipo de caminhão utilizado para o transporte dos painéis da fábrica para o local da obra. Geralmente, para este fim, são utilizados caminhões tipo *munk* que medem aproximadamente 12,00 metros de comprimento, 3,00 metros de largura e 3,58 metros de altura. Dessa forma, o maior comprimento possível do painel deve ser menor do que 12 metros. Além disso, o comprimento dos painéis não deve ultrapassar as dimensões máximas referentes à capacidade dos equipamentos para sua produção na fábrica. A altura dos painéis é definida de acordo com o pé-direito adotado para a edificação e deve ser compatível com as limitações de transporte e produção descritas.

Figura 23 – Definição dos módulos a partir do *layout* do projeto do produto



Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

Nessa etapa, foi considerado como elemento modular o painel de vedação composto pelo quadro estrutural (perfis de madeira) e o fechamento com placa OSB. Não foram consideradas as instalações elétricas e hidráulicas embutidas, nem as placas de revestimento interno (placa de gesso acartonado) e externo (placa cimentícia) dos painéis. Essas características são avaliadas posteriormente, a partir da aplicação do protocolo de caracterização dos módulos e da análise do mapofluxograma do processo produtivo dos painéis.

Conforme descrito anteriormente, o produto desenvolvido apresenta quatro variações, sendo o produto básico e quatro opções de customização (a, b, c, d, e), sendo que a última opção de variação apresentada é referente à área externa para abrigo de veículos, a qual não possui paredes de vedação e, portanto, é desconsiderada nesta etapa do estudo. As demais variantes do produto (que correspondem aos vazios espaciais) são formadas pelos elementos modulares que, por sua vez, são a referência para avaliação da modularidade do produto. Ou seja, a modularidade do produto habitacional está relacionada ao aproveitamento dos elementos modulares (painéis de vedação) na composição das variantes de produto.

A partir das definições da arquitetura e modularidade do produto estudadas, foram aplicados os indicadores propostos por Rocha, Formoso e Tzortzopoulos (2015) para

avaliação da modularidade do produto. Os indicadores foram utilizados durante essa etapa de desenvolvimento do produto para avaliar e comparar as soluções de projeto referentes à definição e ao aproveitamento dos módulos.

A matriz de combinação de módulo foi aplicada com o objetivo de demonstrar a utilização dos módulos nas variantes do produto desenvolvidas, de modo a possibilitar a avaliação do grau de utilização de cada módulo (Tabela 11). Dessa forma, os módulos definidos em projeto foram relacionados às combinações de variantes de produto das quais são parte e foi indicado o número de repetições para cada situação em que os módulos foram utilizados. A partir da relação do número de usos com a quantidade de módulos, chegou-se ao índice de aproveitamento do módulo (MUI).

Tabela 11 – Aplicação da matriz de combinações de módulo

	Variante de produto (a)	Variante de produto (a)+(b)	Variante de produto (a)+(c)	Variante de produto (a)+(d)	Número de usos
Módulo 1	1	1	1	1	3
Módulo 2	1	1	1	1	3
Módulo 3	1	1	1	1	3
Módulo 4	1	1	1	1	3
Módulo 5	1	1	1	1	3
Módulo 6	1	1	1	1	3
Módulo 7	1	1	1	1	3
Módulo 8	3	3	3	4	9
Módulo 9		1			1
Módulo 10		2			2
Módulo 11			1		1
Módulo 12			2		2
				MUI	3,00

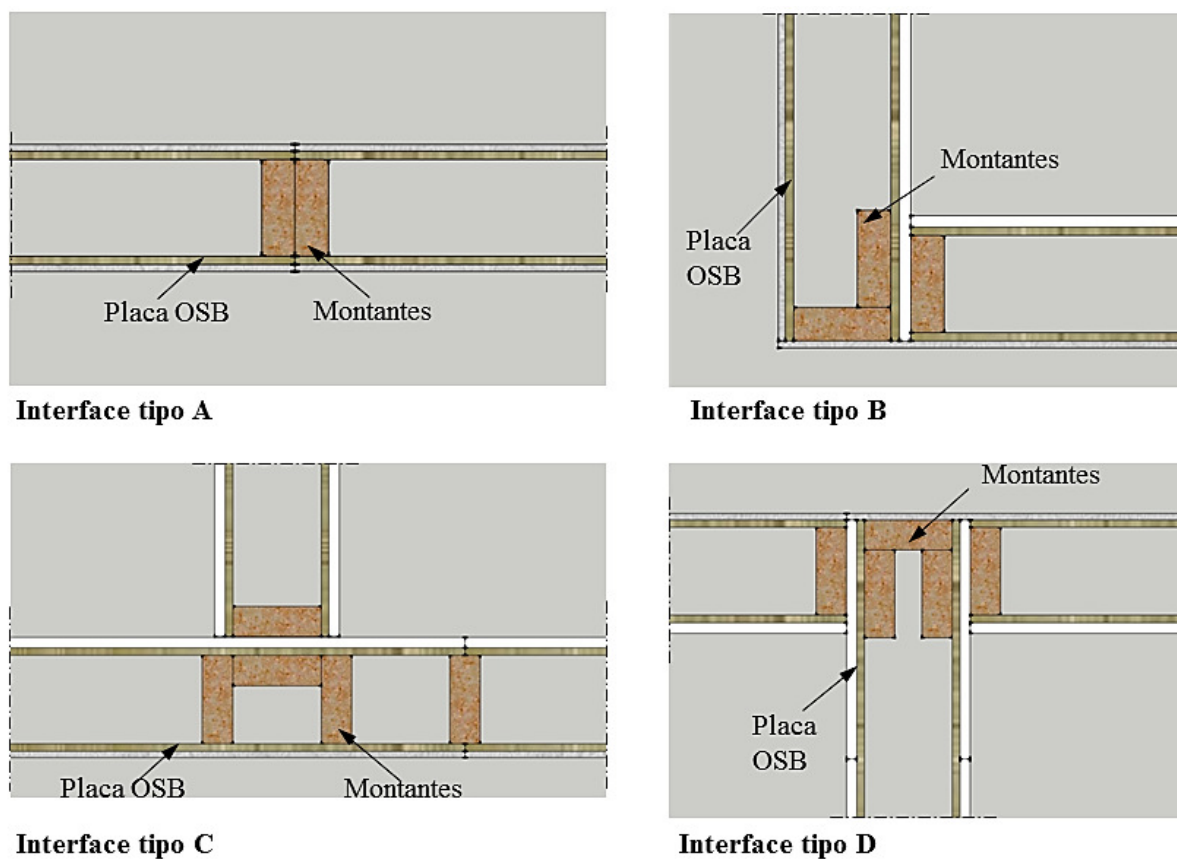
Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

O MUI é de 3,00 porque sete módulos (1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7) são usados três vezes, e um módulo (8) é usado nove vezes por meio das combinações de módulos. A partir dessa representação gráfica, é possível identificar que há uma grande quantidade de módulos diferentes que se repetem poucas vezes para compor as variantes do produto. Para alcançar um índice mais alto de aproveitamento dos módulos, é necessário reduzir a quantidade de elementos modulares diferentes e possibilitar o aumento do número de usos de cada módulo nas variantes do produto.

A matriz de interações de módulo foi aplicada com o objetivo de identificar as interações entre os módulos que compõem o produto, permitindo melhorias nas interfaces entre os módulos. Para isso, foram definidos os tipos de interfaces utilizadas nas interações entre os elementos modulares definidos no projeto do produto. As interfaces correspondem às ligações entre os painéis. Essas ligações são realizadas nos cantos da edificação e nas interseções das paredes. As ligações exigem arranjos especiais dos perfis de madeira para amarração das paredes externas e internas. Dessa forma, as interfaces entre os módulos foram definidas como:

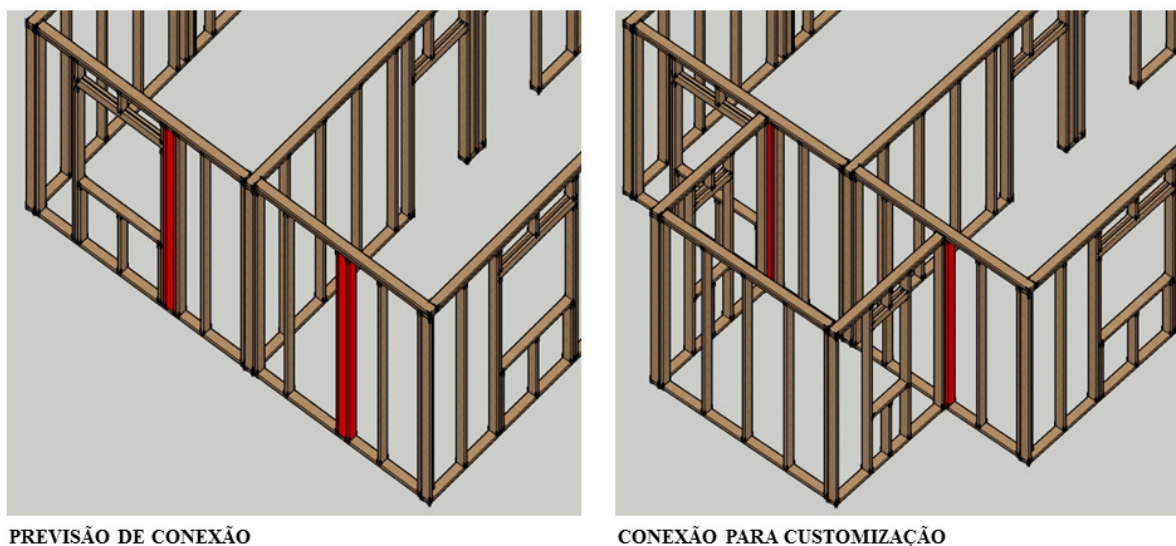
- Interface tipo A: ligação longitudinal entre dois módulos;
- Interface tipo B: ligação entre dois módulos de canto;
- Interface tipo C: ligação perpendicular entre dois módulos;
- Interface tipo D: ligação perpendicular entre três módulos gerando uma união cruzada.

Figura 24 – Tipos de interfaces entre os módulos dos painéis de vedação



Foram consideradas, ainda, as interfaces previstas para futuras ampliações de acordo com as opções de customização propostas. Para isso, os módulos que apresentam interações com as opções de customização, já tem a estrutura para ligação entre os painéis prevista em sua configuração, como mostra a Figura 25.

Figura 25 – Previsão de interfaces entre os elementos modulares para customização



Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

Tabela 12 - Aplicação da matriz de interações de módulo

	Mód. 1	Mód. 2	Mód. 3	Mód. 4	Mód. 5	Mód. 6	Mód. 7	Mód. 8	Mód. 9	Mód. 10	Mód. 11	Mód. 12
Módulo 1												
Módulo 2												
Módulo 3												
Módulo 4	B	D										
Módulo 5	C	C										
Módulo 6	B	D										
Módulo 7		D	B									
Módulo 8		D,C	B,C	D								
Módulo 9												
Módulo 10			A	C				C	B			
Módulo 11												
Módulo 12						C	C				B	

Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

Conforme apresentado na Tabela 12, o módulo com maior número de usos nas variantes do produto (módulo 8) interage com quatro módulos diferentes (2, 3, 4 e 10). Para a realização dessas interações foram identificadas três tipos de interfaces diferentes (B,C e D), que permitem interações com um maior número de módulos. Contudo, as variações dos tipos de interfaces tornam o módulo mais complexo para produção.

O módulo 3, que apresenta apenas três repetições de uso, possui três tipos de interfaces. Ou seja, utiliza uma interface diferente para cada interação. Contudo, não são necessários todos os tipos de interfaces para que o módulo interaja com cada um dos demais módulos. Ou seja, são necessárias diferentes configurações do módulo com as interfaces necessárias para interação com os outros módulos. Isso pode tornar a configuração do módulo mais complexa para produção.

Com base nos resultados obtidos, foram propostas alterações nos módulos do produto com o objetivo aumentar seu índice de aproveitamento. Para isso, buscou-se reduzir a quantidade de módulos e aumentar a repetição dos mesmos na composição das variantes de produto. Além disso, procurou-se observar as variações nas interações entre os módulos, de modo a reduzir as variações de interfaces e simplificar a configuração dos módulos.

Na nova proposta de definição dos módulos, procurou-se identificar aqueles com maior potencial de aproveitamento para substituição de módulos que apresentam número menor de repetições. Dessa forma, alguns módulos propostos foram suprimidos ou sofreram alterações em sua configuração para que pudessem atender um maior número de repetições, conforme mostra a Tabela 13.

Tabela 13 – Alteração dos módulos existentes para melhoria da modularidade do produto

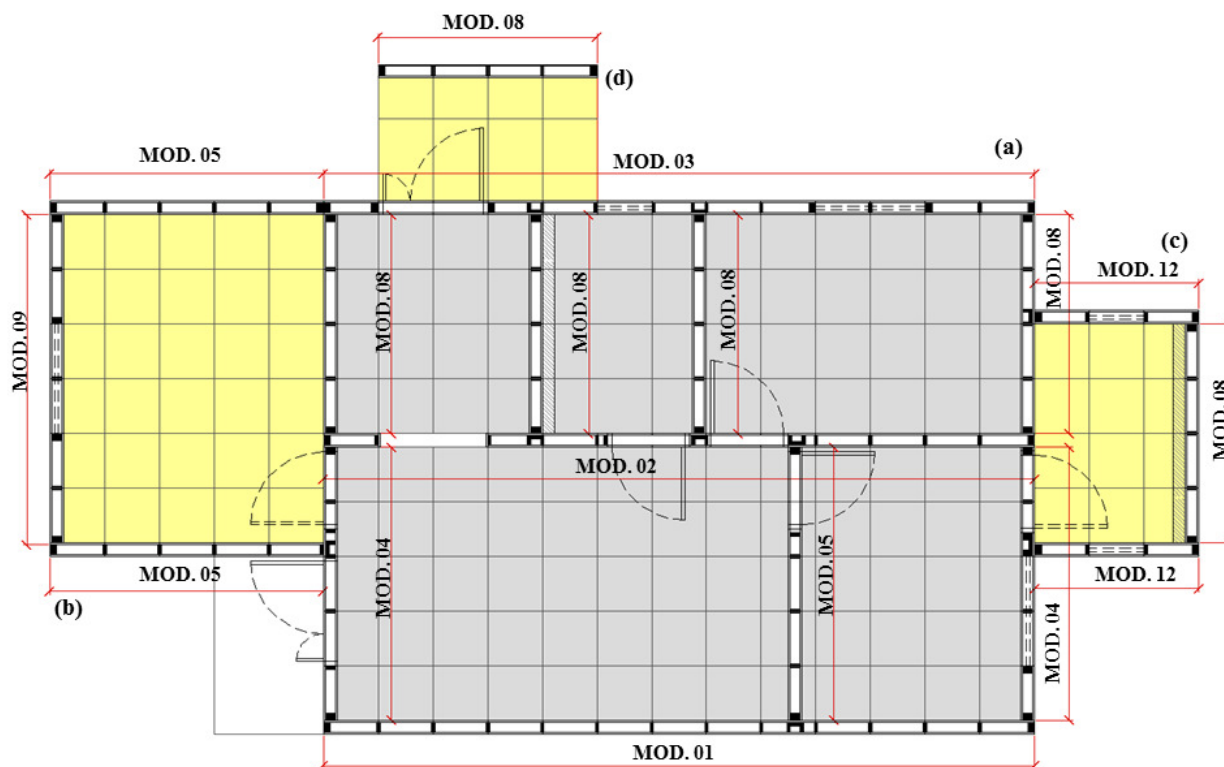
Módulos mantidos	Módulos alterados	Módulos suprimidos
MÓD. 01	MÓD. 02	MÓD. 06
MÓD. 03	MÓD. 04	MÓD. 07
MÓD. 05	MÓD. 13	MÓD. 10
MÓD. 08		MÓD. 11
MÓD. 09		

Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

Para essas definições, foram avaliados módulos de comprimento (distância entre as extremidades do painel no eixo longitudinal) igual ou aproximado, bem como módulos com os mesmos tipos e dimensões de aberturas, para a proposição de alterações que permitissem a substituição de alguns módulos para o melhor aproveitamento de outros. Essas alterações

correspondem a ajustes dimensionais no comprimento dos módulos e na posição das esquadrias no eixo horizontal dos painéis (Figura 26).

Figura 26 - Definição dos módulos com base nas alterações propostas



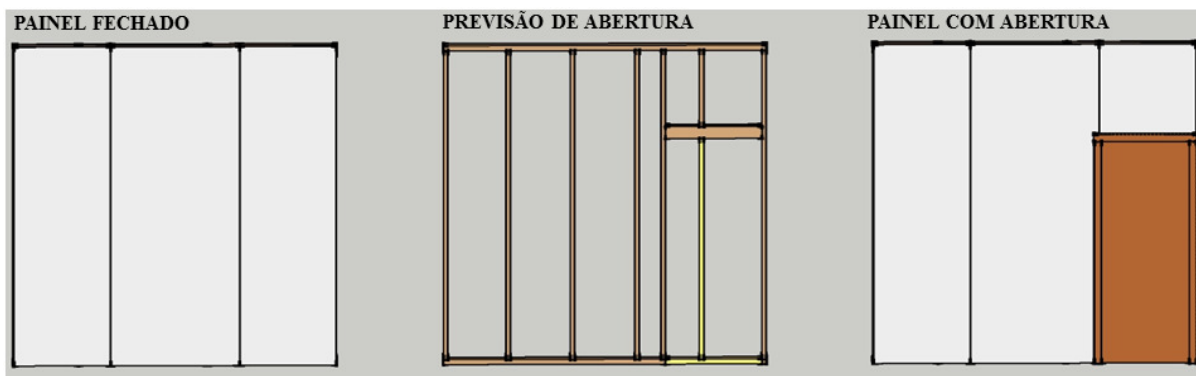
Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

O módulo 6 foi substituído pelo módulo 4 por meio da alteração das dimensões e posição da porta, de modo a possibilitar a repetição do módulo. O módulo 7 foi substituído pelo módulo 8 a partir da supressão da abertura de janela existente. O módulo 10 foi substituído pelo módulo 5 a partir da adição de uma abertura de portas, de modo a possibilitar um novo acesso na opção de customização (b). Essa alteração permitiu a criação de uma nova variante de produto por meio da alteração de uso do ambiente previsto inicialmente como dormitório, que também poderá ser utilizado como espaço comercial (escritório, oficina, atelier, etc.), conforme mostra a Figura 27.

O módulo 11 foi substituído pelo módulo 8 a partir do aumento de seu comprimento em uma unidade da modulação de 60 centímetros. Essa alteração resultou no aumento da área do sanitário proposto como customização, equivalente ao sanitário do *layout* básico. O acréscimo de área e, conseqüentemente, de material decorrentes dessa solução podem ser compensados pelo ganho na economia de escala. Ou seja, a redução na quantidade de

módulos permite ganhos na simplificação do produto e da produção, que possibilitam economias no processo produtivo e redução no tempo de entrega do produto.

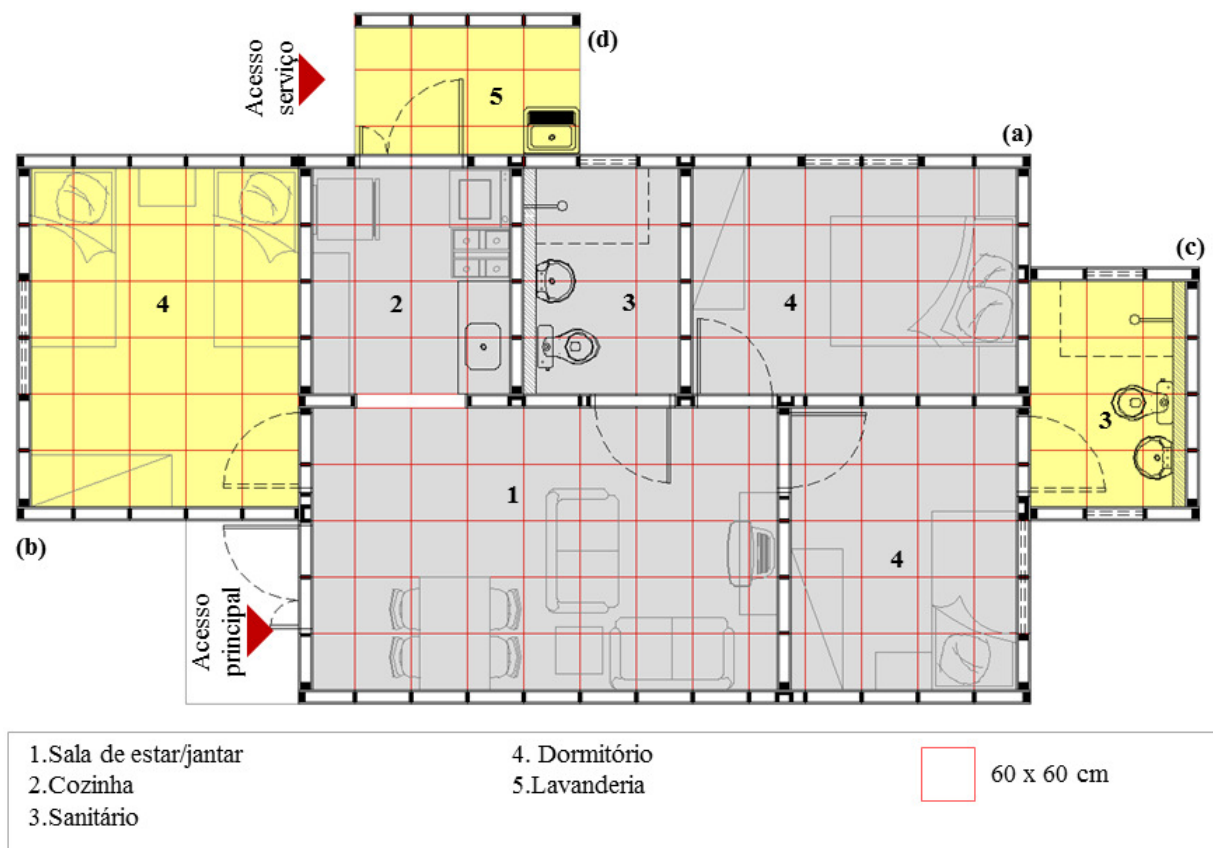
Figura 27 – Previsão de aberturas para customização dos elementos modulares



Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

As modificações propostas nos módulos dos painéis de vedação não causaram impacto no programa de necessidades da habitação proposta, uma vez que não foram alterados os usos dos ambientes. Contudo, houve o aumento de área do sanitário referente à opção de customização (c), devido à substituição do painel de vedação (módulo 11) utilizado na proposta inicial por um painel maior (módulo 8). O *layout* do produto e suas variações após as alterações dos elementos modulares são ilustrados na Figura 28.

Figura 28 – Modulação das áreas internas da habitação com base nas alterações propostas



Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

A matriz de combinação de módulo foi novamente aplicada com o objetivo de demonstrar a utilização dos elementos modulares, de modo a possibilitar a avaliação do grau de utilização de cada módulo com base nas alterações propostas no produto (Tabela 14).

Tabela 14 - Aplicação da matriz de combinações de módulo, com base nas alterações propostas

	Variante de produto (a)	Variante de produto (a)+(b)	Variante de produto (a)+(c)	Variante de produto (a)+(d)	Número de usos
Módulo 1	1	1	1	1	4
Módulo 2	1	1	1	1	4
Módulo 3	1	1	1	1	4
Módulo 4	2	2	2	2	8
Módulo 5	1	3	1	1	6
Módulo 6			suprimido		0
Módulo 7			suprimido		0
Módulo 8	4	4	5	5	18
Módulo 9		1			1
Módulo 10			suprimido		0
Módulo 11			suprimido		0
Módulo 12			2		2
				MUI	5,88

Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

O MUI é de 5,88 porque a maioria dos módulos é utilizada pelo menos quatro vezes, e um módulo (8) é usado dezoito vezes por meio das combinações de módulos. O valor alcançado para o indicador, a partir desta nova proposta, é quase 50% maior do que MUI da proposta anterior. A partir dessa representação gráfica, é possível identificar a redução da quantidade de módulos diferentes e que se repetem um número maior de vezes para compor as variantes do produto em relação à proposta anterior. Das variações de módulos, quatro foram suprimidas e substituídas por outros módulos existentes por meio de pequenas alterações descritas anteriormente.

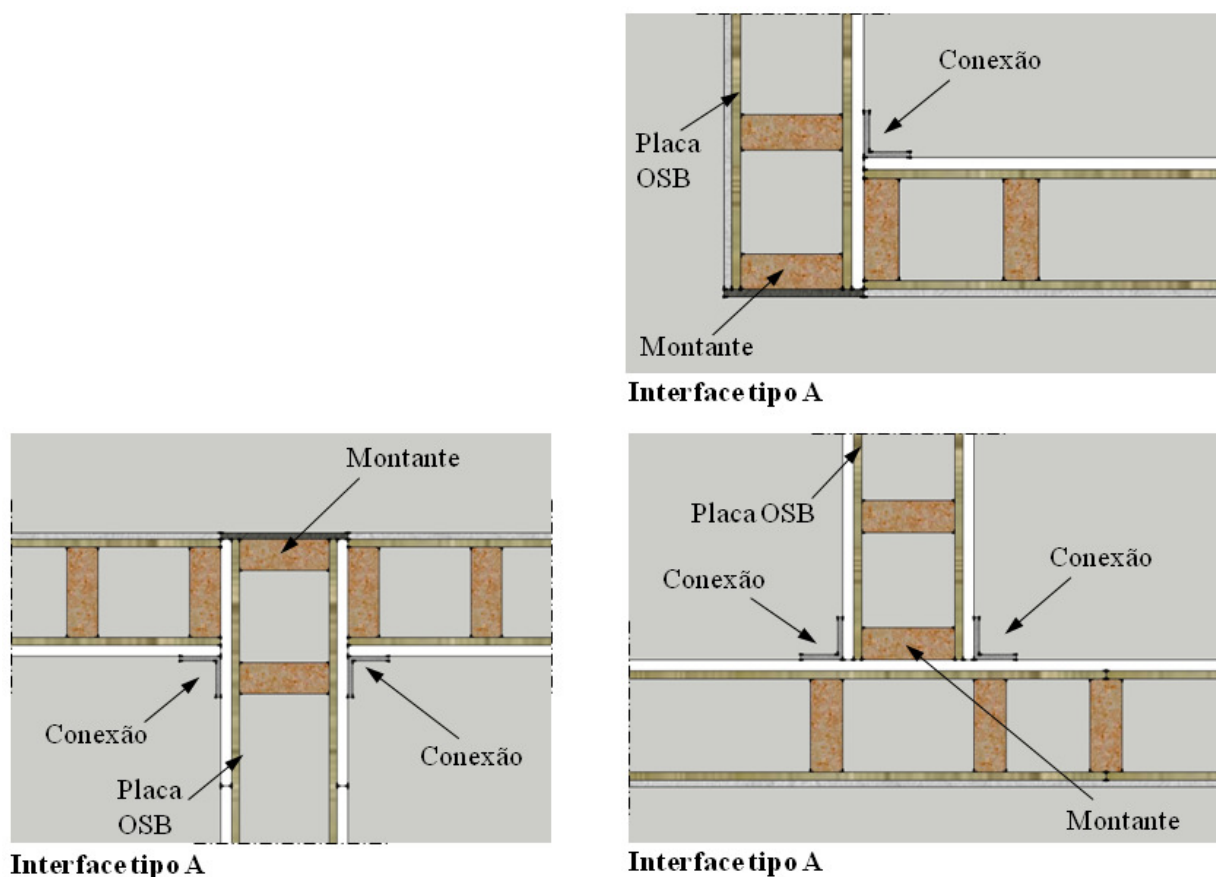
Em relação às interfaces, foi proposta a criação de uma interface padrão para a ligação entre os painéis, de modo a reduzir as variações existentes e simplificar a configuração dos módulos. Para isso, foi proposta a utilização de uma cantoneira metálica como elemento de fixação, para permitir a realização de três tipos de interações diferentes a partir do mesmo tipo de interface.

Assim, para a fixação entre dois painéis em ligação de canto e para ligação perpendicular entre três painéis (união cruzada), são utilizados elementos especiais (cantoneiras metálica) nas extremidades dos painéis, em substituição à fixação direta, por meio de parafusos ou pregos, entre os montantes de painéis diferentes (Figura 29). Para isso, foram adicionados montantes auxiliares, com espaçamento de 15 centímetros em relação ao

eixo dos montantes previstos nas extremidades de cada painel. Dessa forma, as interfaces entre os módulos foram definidas como:

- Interface tipo A: fixação por meio de cantoneira metálica para ligação entre dois módulos de canto, ligação perpendicular entre dois módulos e ligação perpendicular entre três módulos, gerando uma união cruzada;

Figura 29 – Proposta de padronização das interfaces, com base nas alterações propostas



Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

Em sequência, foi aplicada novamente a matriz de interações de módulo com o objetivo de possibilitar identificar o número de interações entre os módulos, quais módulos interagem com outros módulos e quais as variações de interfaces existentes no produto de com base nas alterações propostas, como mostra a Tabela 15.

Tabela 15 - Aplicação da matriz de interações de módulo, com base nas alterações propostas

	Mód. 1	Mód. 2	Mód. 3	Mód. 4	Mód. 5	Mód. 6	Mód. 7	Mód. 8	Mód. 9	Mód. 10	Mód. 11	Mód. 12
Módulo 1												
Módulo 2												
Módulo 3												
Módulo 4	A	A										
Módulo 5	A	A		A								
Módulo 6			suprimido									
Módulo 7			suprimido									
Módulo 8		A	A		A							
Módulo 9					A							
Módulo 10			suprimido									
Módulo 11			suprimido									
Módulo 12				A				A				

Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

As modificações propostas na configuração dos elementos modulares resultaram em uma redução na variação de interfaces por módulo e por interação. Todos os módulos interagem por meio da mesma interface. A maior quantidade de interações ocorre com o módulo 5 que interage com os módulos 1, 2, 4, 8 e 9. O módulo 3 interage com apenas um módulo (8), bem como o módulo 9, que interage apenas com o módulo 5. Os demais módulos interagem com, pelo menos, dois outros módulos diferentes.

A quantidade de interações reduziu em relação ao projeto inicial, uma vez que houve a supressão de quatro tipos de módulos. Isso mostra que a partir da redução das variações de tipos e da padronização dos componentes e elementos foi possível simplificar tanto os tipos de módulos como os tipos de interfaces dos painéis de vedação.

As análises referentes à modularidade orientaram o desenvolvimento do produto direcionado ao uso mais eficiente dos módulos. Os resultados encontrados nessa etapa da pesquisa permitiram refinar a configuração dos módulos propostos para a composição do produto, de modo a alcançar uma maior economia de escopo e potencializar a simplificação do processo produtivo. A simplificação do processo em fábrica se dá pela padronização dos elementos modulares (painéis).

5.2.2 *Caracterização e análise dos módulos propostos*

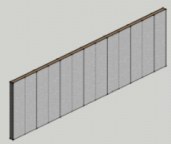
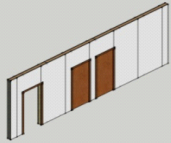
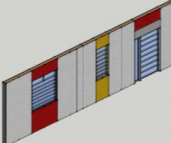

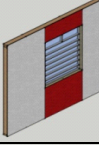
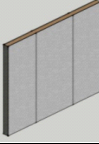
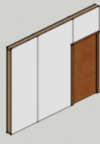
Posteriormente à definição e análise da modularidade dos painéis de vedação, foi criado um protocolo para auxiliar a visualização dos módulos criados durante o desenvolvimento do produto. O protocolo consistiu em uma planilha para o registro, identificação e caracterização de cada um dos módulos de painéis de vedação vertical da habitação. Assim, foi possível identificar as diferenças entre os módulos e as características que pudessem influenciar no seu potencial de aproveitamento.

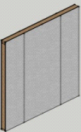

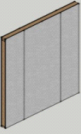

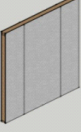
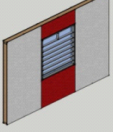
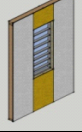
Essas características consistem em variantes que podem impossibilitar a repetição dos módulos existentes e o aproveitamento de módulos com dimensões iguais ou aproximadas e, conseqüentemente, impactar na economia de escopo na produção do produto. Dessa forma, a caracterização dos módulos levou em consideração as instalações elétricas e hidráulicas embutidas, e as diferenças de revestimento interno (placa de gesso acartonado) e externo (placa cimentícia) dos painéis, além da configuração estrutural dos módulos já considerada. A Tabela 16 apresenta as informações descritas e destaca as causas de diferenciação entre módulos semelhantes.

A análise da caracterização dos módulos permitiu refinar a configuração dos painéis propostos para a composição do produto, de modo a alcançar uma maior economia de escopo e potencializar a simplificação do processo produtivo. Dessa forma, é possível definir famílias de módulos baseada em semelhanças referentes às dimensões totais e à presença de aberturas em cada módulo.

As famílias podem ser formadas a partir de painéis com o mesmo quadro estrutural (dimensões totais de altura e comprimento, distribuição dos montantes e dimensões das aberturas) com fechamento em placa OSB. Os módulos dentro de cada família variam conforme os tipos de placas utilizadas para revestimento interno e externo, a presença de instalações elétricas e/ou hidráulicas e as dimensões das aberturas.

Tabela 16 - Registro e caracterização dos módulos extraídos do projeto do produto, com base nas alterações propostas

Identificação	Largura (cm)	Interfaces	Revestimento		Instalações	Aberturas			Representação gráfica
			Gesso	Cimentícia		Tipo	Largura (cm)	Altura (cm)	
M-01	780	A	Sim	Sim	Elétricas	-	-	-	
M-02	780	A	Sim	Não	-	Porta	90	210	
M-03	780	A	Sim	Sim	-	Porta	120	250	
M-04a	300	A	Sim	Sim	Elétricas	Porta-janela/Porta	120 / 90	250 / 210	
M-04b	300	A	Sim	Sim	Elétricas	Janela/Porta	120 / 90	150 / 210	
M-05a	300	A	Sim	Sim	Elétricas	-	-	-	
M-05b	300	A	Sim	Não	Elétricas	Porta	90	210	

M-08a	240	A	Sim	Sim	Elétricas/Hidráulicas	-	-	-	
M-08b	240	A	Sim	Não	Elétricas/Hidráulicas	-	-	-	
M-08c	240	A	Sim	Sim	Elétricas	-	-	-	
M-08d	240	A	Sim	Não	Elétricas	-	-	-	
M-08e	240	A	Sim	Sim	Elétricas	-	-	-	
M-09	480	A	Sim	Sim	-	Janela	120	150	
M-12	180	A	Sim	Sim	-	Janela	60	150	

Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

5.2.3 *Síntese conclusiva do estudo de caso principal*

Nesse estudo, foi considerada a perspectiva dos componentes para definição dos módulos e análise da modularidade do produto. Os painéis de vedação foram denominados elementos modulares e as interações entre esses módulos correspondem às relações entre as suas interfaces (ligações entre os painéis). A perspectiva dos componentes foi adotada considerando a produção em fábrica desses elementos.

No primeiro estudo, a análise da modularidade do produto habitacional proposto, por meio da aplicação de indicadores, mostrou que é possível identificar a ocorrência de uma grande quantidade de módulos diferentes que se repetem poucas vezes para compor as variantes do produto. Para alcançar um índice mais alto de aproveitamento dos módulos, foi necessária a revisão dos módulos propostos, de modo a reduzir a quantidade de elementos modulares diferentes e possibilitar o aumento do número de usos de cada módulo nas variantes do produto.

A partir da análise do segundo estudo, foi possível identificar a redução da quantidade de módulos diferentes e que se repetem um número maior de vezes para compor as variantes do produto em relação à proposta anterior. Além disso, foi definida uma interface padrão para a realização dos três tipos de interações diferentes entre os painéis. Isso permitiu reduzir as variações de interfaces existentes e simplificar a configuração dos módulos.

Os resultados dos estudos mostraram que as análises da modularidade orientaram a definição dos módulos durante o desenvolvimento do produto. As alterações baseadas nas análises realizadas resultaram em um índice mais alto de aproveitamento dos módulos, permitindo alcançar uma maior economia de escopo e potencializar a simplificação do processo produtivo.

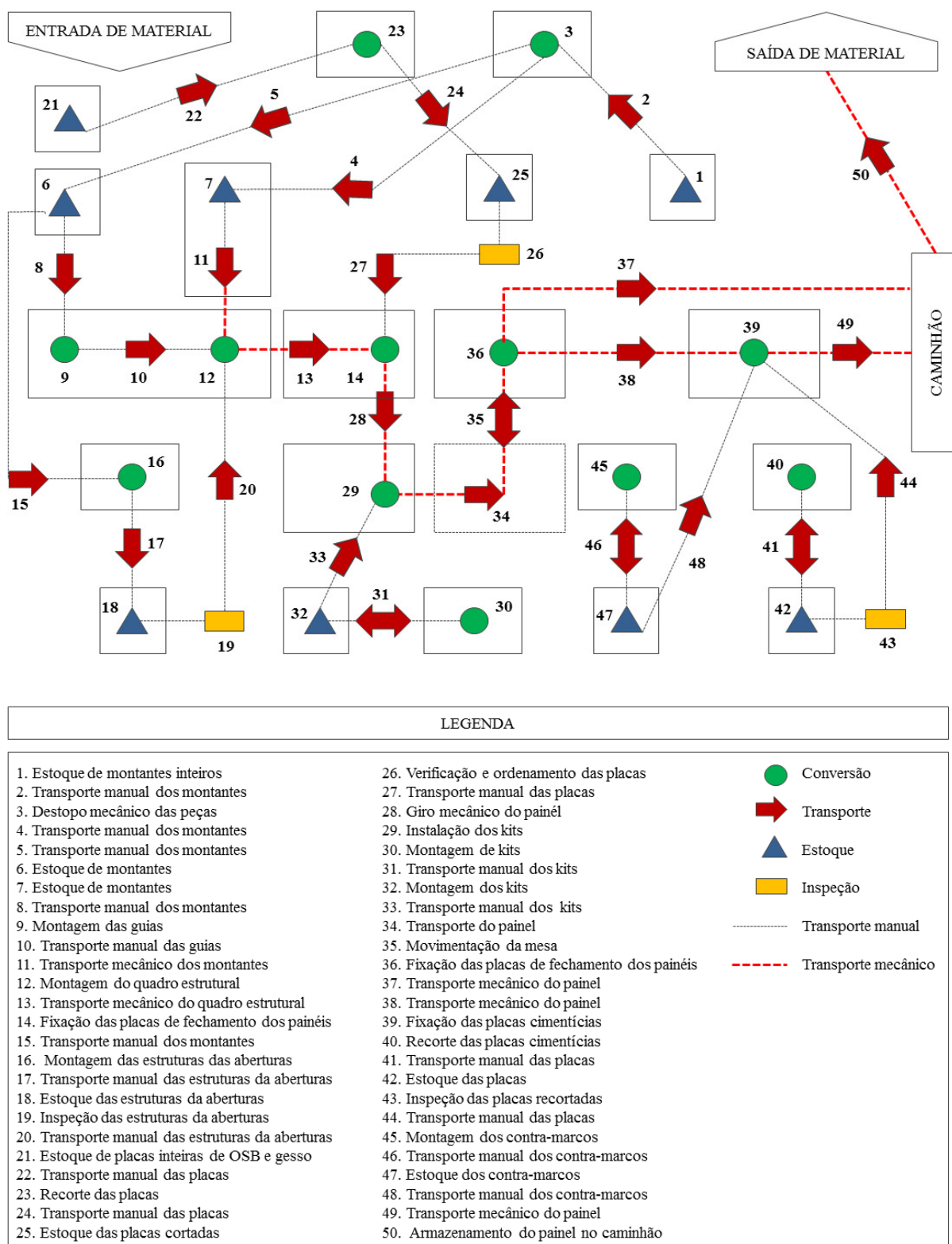
5.3 Avaliação das decisões de projeto do produto

Conforme descrito no Capítulo 4, após a segunda fase do estudo de caso, foi realizada a avaliação das diretrizes propostas a partir de visita à fábrica da “Empresa A” e das entrevistas com os gestores de engenharia de produto, de engenharia de operações e de projetos de produção. Além disso, foi realizado mapeamento do processo produtivo, por meio da observação direta da produção dos painéis e da elaboração de um mapofluxograma desse processo.

5.3.1 Mapeamento do processo de produção dos painéis de vedação

O mapofluxograma foi elaborado com o objetivo de facilitar o entendimento dos processos observados e auxiliar na análise e identificação das perdas e outros problemas que ocorriam entre as diferentes atividades produtivas. Com isso, foi possível registrar as atividades desempenhadas durante o processo produtivo dos painéis de vedação e o local onde as mesmas são realizadas, por meio de uma simbologia específica (Figura 30). Não foi possível realizar o levantamento fotográfico do processo produtivo dos painéis devido às restrições de reprodução e divulgação de imagens definidas pela empresa.

Figura 30 – Mapofluxograma do processo de produção dos painéis de vedação



Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

Conforme descrito pela “Empresa A”, após a definição do produto em forma de projeto arquitetônico básico, são realizadas reuniões para apresentação do produto à equipe da fábrica. Nessa etapa, é realizada a verificação da linha de montagem de acordo com o projeto definido. Um membro da equipe de projetos residente na fábrica é responsável por realizar as compatibilizações com o processo de produção dos painéis. Dessa forma, o projeto do produto deve sempre estar de acordo com o seu processo produtivo.

O processo de produção dos painéis de vedação vertical em sistema tipo LWF é composto por um processo principal que corresponde ao fluxo de montagem dos painéis, e seis subprocessos: (a) destopo dos montantes; (b) montagem da estrutura das aberturas; (c) corte das placas OSB e de gesso acartonado; (d) montagem dos *kits* de instalações hidrossanitárias e elétricas; (e) corte das placas cimentícias; e (f) montagem dos contramarcos.

Os componentes utilizados no processo produto sofrem ajustes dimensionais conforme as necessidades do projeto do produto (montantes, placas de vedação). Os painéis de vedação são totalmente montados na fábrica até o acabamento com revestimento em placa cimentícia ou gesso acartonado. A instalação das esquadrias e os acabamentos finais nas paredes são realizados no local da obra.

O processo de produção tem início na montagem das guias que compõem o quadro estrutural. Os montantes utilizados como guias são unidos por meio de conectores metálicos para atingir o comprimento necessário que corresponde ao comprimento total do painel. Assim, todos os montantes utilizados na produção dos painéis apresentam originalmente as mesmas dimensões (seção transversal e comprimento) e são cortados conforme sua função no sistema (montante, guia, verga, contraverga, umbral).

Os montantes que chegam à fábrica nas dimensões originais são estocados (1) próximos à máquina que realiza o destopo das peças (3) em um subprocesso paralelo (a) ao fluxo principal de montagem dos painéis. O transporte dos montantes do estoque para a máquina é realizado de forma manual (2). Os montantes destopados também são transportados manualmente (4, 5) e distribuídos em duas áreas de estoque. Um estoque é localizado próximo à área de montagem das guias superiores e inferiores (6). O outro estoque abastece a máquina que realiza a fixação dos montantes nas guias, para composição do quadro estrutural (7). Posteriormente, os montantes são transportados manualmente por um operário (8) até a mesa para realização das conexões para montagem das guias (9).

Após a montagem, as guias superiores e inferiores são colocadas manualmente (10) na máquina localizada na área central do galpão. Os montantes do segundo estoque são transportados mecanicamente (11) até a máquina que realiza a fixação dos mesmos nas guias

(12). No caso de painéis sem aberturas, o quadro estrutural montado é transportado mecanicamente (13) até a mesa onde são fixadas as placas OSB e de gesso acartonado (14) para o fechamento de um dos lados do painel.

Para a montagem do quadro estrutural de painéis com aberturas, ocorre um fluxo paralelo que corresponde ao subprocesso de corte dos montantes em peças menores (vergas, contravergas, umbrais) e montagem das estruturas das aberturas do painel (b). Os montantes estocados (6) são transportados manualmente (15) até a mesa para montagem dessas peças (16). Posteriormente à montagem, as peças são transportadas manualmente (17) até um estoque (18), ao lado da mesa de montagem, para a finalização da fixação dos montantes nas guias (12). As peças das aberturas são verificadas quanto ao tipo de painel e o posicionamento em que serão instaladas no quadro estrutural (19). Após a fixação dos montantes que seguem a modulação normal nas áreas sem aberturas do painel, as peças verificadas são transportadas manualmente (20) para a mesa e fixadas manualmente no quadro estrutural montado (12). Após a fixação das estruturas das aberturas, o painel segue no fluxo do processo principal para a instalação das placas de vedação (14).

As placas OSB e de gesso acartonado que chegam inteiras à fábrica são inicialmente estocadas (21) e, posteriormente, transportadas manualmente (22) para uma máquina onde são cortadas manualmente em seções menores (23) em um subprocesso paralelo (c) à montagem dos painéis. Após o recorte, conforme definições de projeto, as placas são transportadas de forma manual (24) e estocadas (25) próximas à máquina que realiza a sua fixação no quadro estrutural (14). Após verificação e ordenamento das placas para instalação (26), estas são transportadas manualmente (27) até a máquina para fixação no quadro estrutural (14).

As placas OSB são pré-fixadas de forma manual e, posteriormente, grampeadas mecanicamente no quadro estrutural. As placas de gesso acartonado são posicionadas e parafusadas manualmente com o auxílio de um gabarito para a situação dos furos. Após a fixação das placas OSB e de gesso acartonado, o painel é girado mecanicamente (28) e posicionado em outra mesa para realização dos procedimentos citados no seu lado oposto. Antes da fixação das placas OSB e de gesso acartonado no outro lado do painel, são inseridos os *kits* de instalações hidrossanitárias e elétricas (29) entre os montantes do quadro estrutural exposto. A montagem dos *kits* (30) é realizada em um subprocesso paralelo (d) e as peças montadas são transportadas manualmente (31) até a área de estoque (32) próxima à mesa de montagem dos kits. Os *kits* são levados por um operário (33) até a mesa onde se situa o painel (29).

Em sequência, o painel é transportado mecanicamente para outra mesa (34) e retorna ao fluxo principal (35) para instalação das placas OSB e de gesso acartonado (36). No caso de paredes internas revestidas em ambos os lados por gesso acartonado, o processo de montagem é finalizado e os painéis são transportados mecanicamente até o caminhão (37) que irá realizar o transporte da carga até o local da obra (50). As paredes destinadas à vedação externa da habitação apresentam revestimento em placa cimentícia em um dos lados. Assim, após a inserção dos *kits* de instalações, são instaladas as placas OSB (36) e o painel é transportado mecanicamente (38) para outra mesa, onde são parafusadas as placas cimentícias (39).

Em um subprocesso paralelo (e), as placas cimentícias são recortadas em seções menores (40), conforme projeto, para instalação sobre as placas OSB da face externa do painel. Após o recorte, as placas são transportadas manualmente (41) e estocadas (42) próximas à mesa em que serão instaladas no painel. Após a verificação das dimensões e posicionamento de cada placa recortada (43), as mesmas são carregadas por dois operários (44), devido ao peso, até a mesa de montagem do painel (39). As placas cimentícias são posicionadas sobre as placas OSB e são pré-furadas antes de serem parafusadas no painel.

Após a finalização da fixação das placas cimentícias, são instalados os contramarcos nas aberturas dos painéis onde são previstas janelas, de modo a garantir a estanqueidade do sistema. Os contramarcos são montados na própria fábrica, a partir de chapas metálicas que são cortadas e dobradas conforme o dimensionamento das aberturas (45), em um fluxo de produção paralelo (f). Posteriormente, os contramarcos são estocados (47) próximos ao fluxo principal de montagem dos painéis e transportados manualmente (48) até a mesa onde são fixadas as placas cimentícias (39). A última etapa do processo de produção corresponde ao transporte mecânico (49) dos painéis acabados até o compartimento de carga do caminhão (50).

Conforme a “Empresa A”, a produção dos painéis na fábrica deve seguir a sequência de montagem em obra, para melhor utilização dos guindastes e logística de locação na obra. Contudo, uma mesma edificação pode apresentar sequências diferentes de montagem dependendo da situação do local em que será montada, devido a condicionantes, como situação do terreno, equipamentos para transporte. O caminhão (tipo *munk*) descarrega os painéis na ordem que serão montados na obra. O próprio guindaste que retira o painel do caminhão irá posicioná-lo no ponto da laje de piso definida em projeto para montagem. Assim, deve ser realizado o projeto do guindaste que será utilizado para a movimentação dos painéis e montagem da edificação no local da obra.

Os pontos críticos da produção em relação às perdas (transporte, estoque, retrabalhos) levantados pela “Empresa A”, correspondem às atividades de transporte materiais e produtos que são realizadas de forma manual. Conforme as informações, o subprocesso de maior complexidade corresponde ao de corte, transporte e fixação das placas cimentícias nos painéis, uma vez que trata de um material de difícil manipulação, que até o momento dispõe de pouca automação na fábrica. Isso se deve ao elevado peso desses componentes, a dificuldade de realização de cortes e a variedade de formatos necessária para aplicação na vedação dos painéis. Além disso, a fragilidade do material e o alto custo agregado tornam a atividade de fixação das placas nos painéis uma etapa crítica do processo.

As medidas de eficiência e controle de perdas adotadas pela “Empresa A”, são voltadas para a produção dos elementos construtivos e da própria edificação. Nesse sentido, os esforços para redução de perdas são focados no processo de produção dos painéis na fábrica e na logística de transporte e montagem da edificação no local da obra.

Uma estratégia adotada para redução do tempo de produção compreende ao projeto de um painel múltiplo, em que várias paredes são produzidas ao mesmo tempo e separadas em uma etapa posterior do processo. Essa estratégia ajuda no balanceamento da linha de produção em relação às dimensões dos painéis produzidos, uma vez que são necessárias marcações para posicionamento nas máquinas, e na redução do tempo de produção, pela redução da quantidade de processos, transporte e espera.

Assim, no caso de obras repetitivas é vantajoso que não ocorram muitas alterações na linha de produção para adequação de produtos personalizados, nem a aquisição de materiais diferentes, como seções transversais variadas de montantes. As medidas de automação da produção também representam a maior parte dos esforços para redução do tempo de entrega, a partir da redução da espera e do tempo de ciclo na produção.

Com base nas informações levantadas e no mapeamento do processo, foram analisados os pontos críticos da produção dos painéis de vedação. A partir dessa análise, foi avaliado o constructo “complexidade do fluxo de produção” dos subprocessos, que compreendem etapas críticas do processo geral. Este constructo é desdobrado em variáveis baseadas no mapeamento do ciclo básico de produção: (a) grau de interdependência dos processos (GIP); e (b) grau de padronização das operações (GPO).

5.3.2 Avaliação da complexidade dos subprocessos de produção

Para avaliação da complexidade do processo de produção dos painéis, foram analisados os subprocessos, uma vez que compreendem atividades críticas como: transporte e corte manual de componentes (placas OSB, de gesso acartonado e cimentícia) e montagem manual de elementos (estrutura das aberturas dos painéis e fixação das placas cimentícias). Os subprocessos foram analisados com base no constructo “complexidade do fluxo de produção”, com o objetivo de identificar possibilidades de simplificação do processo. Para isso, foram avaliadas variáveis referentes ao grau de interdependência de processos e ao grau de padronização das operações, com base nos indicadores descritos no tópico 4.3.

A análise da interdependência de processos buscou avaliar a relação entre as atividades do fluxo de produção e as dependências estabelecidas entre os subprocessos que afetam o processo geral de produção dos painéis. As variações dos módulos de painéis dentro das famílias para a produção de painéis com instalações, esquadrias e placas cimentícias levam à necessidade de criação de subprocessos paralelos ao fluxo de produção principal.

A separação dos processos em unidades focalizadas (subprocessos), voltadas a produzir partes que devem ser inseridas no painel, contribui para o aumento da transparência. Por outro lado, estas particularidades nos painéis, levam a um aumento da interdependência dos processos, denotando certo prejuízo ao processo de produção, uma vez que haverá um ponto a mais de interdependência. Por exemplo, no caso da existência de aberturas (esquadrias), haverá interdependência entre as atividades de processamento 9, 12 e 16, enquanto nos painéis em que não há aberturas, a interdependência ocorre somente entre as atividades de processamento 9 e 12.

Os inconvenientes destas relações de dependência entre os subprocessos se agravam devido à predominância de trabalho manual, podendo resultar em atrasos no processo. No exemplo anterior, a montagem das estruturas das aberturas, por exemplo, é um subprocesso que ocorre simultaneamente à montagem dos quadros estruturais. Entretanto, esse processo é realizado por um operário de forma manual, enquanto o outro é realizado mecanicamente. Assim, além de demandar um número maior de atividades, o subprocesso de montagem das estruturas das aberturas exige também maior tempo para sua realização, o que aumenta a ocorrência de atrasos no processo de montagem dos quadros estruturais.

A utilização do indicador do grau de interdependência de processos (GIP) permite explicar o impacto das variações de painéis dentro das famílias. Essas variações de painéis dentro das famílias causam impacto no processo de fabricação dos painéis, uma vez que

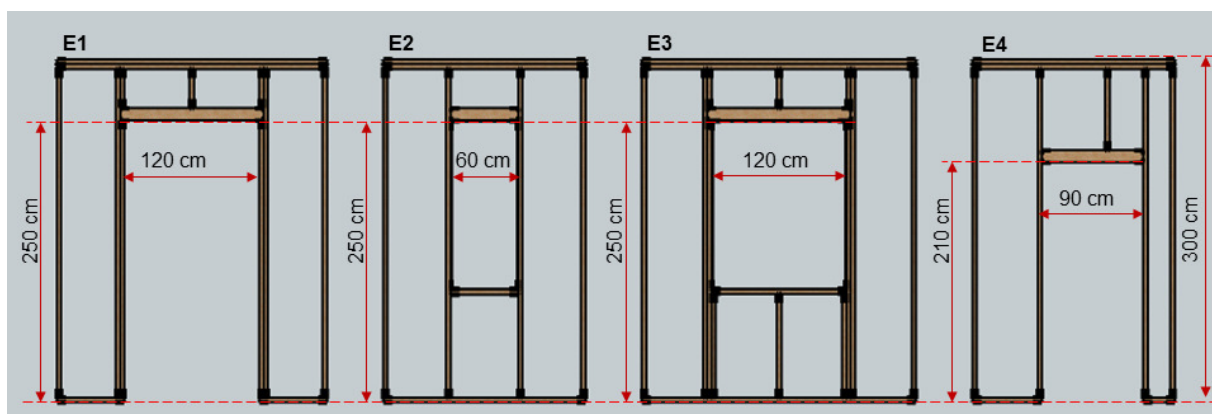
levam a um GIP pior e a uma menor simplificação do processo. Por outro lado, é possível adotar medidas que amenizem esse impacto, a partir da padronização dos componentes que irão compor os painéis com diferenciações dentro das famílias. Esta medida é especialmente importante quando o subprocesso que produz essas particularizações é manual.

A predominância de atividades manuais no processo de produção dos painéis demanda maior grau de habilidade da mão de obra. Muitas atividades realizadas nos subprocessos exigem certo grau de especialização da mão de obra, como a montagem da estrutura das aberturas dos painéis, a montagem dos *kits* de instalações e o corte e fixação das placas cimentícias.

A existência de funções muito especializadas dificulta a utilização de mão de obra polivalente, impossibilitando realocações de equipes (SAN MARTIN, 1999). Nesse sentido, o subprocesso referente à montagem da estrutura das aberturas dos painéis corresponde a uma etapa crítica, uma vez que se trata de trabalho totalmente manual, tornando o processo mais suscetível a erros e atrasos. A montagem dessas peças requer que os montantes sejam medidos e cortados em diversas seções inferiores, que são utilizadas como vergas, contravergas, e peças de composição superior e inferior, para reforço nas áreas com aberturas.

No estudo de caso da presente pesquisa, foi proposta a padronização das dimensões das aberturas, conforme a modulação dos painéis de vedação. Dessa forma, a largura dos vãos das aberturas apresentou variações de 60, 90 e 120 centímetros, enquanto a altura apresentou variações de 250 e 210 centímetros. Essa padronização teve como objetivo limitar o número de variações possíveis na configuração da estrutura e fechamento dos painéis com aberturas e na definição das esquadrias utilizadas no produto. Assim, foi possível reduzir também a variação na dimensão das peças das estruturas das aberturas, bem como a necessidade de corte nos montantes para criar peças de diferentes tamanhos.

Figura 31 – Estruturas padronizadas dos painéis de vedação com aberturas



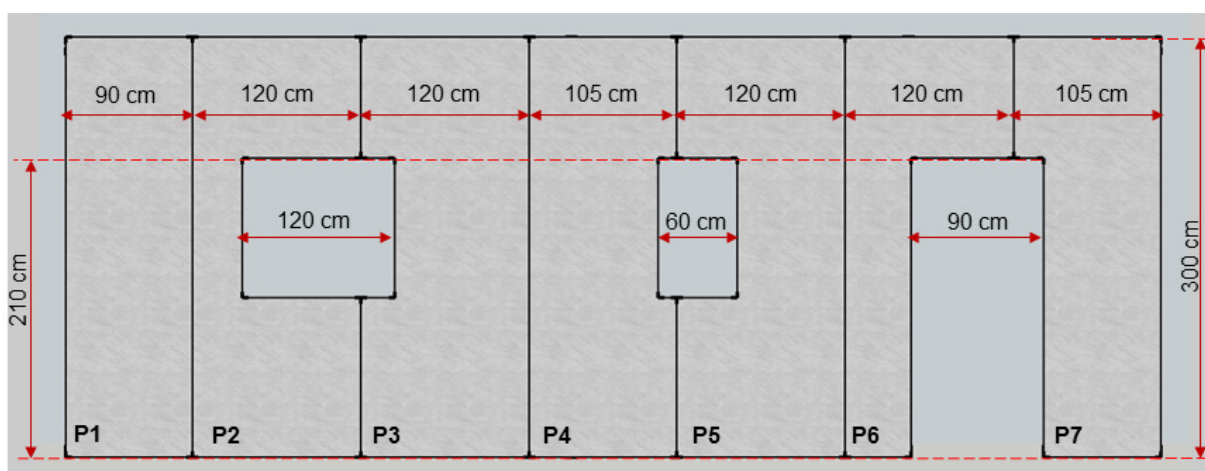
Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

A utilização de componentes e elementos padronizados pode minimizar a necessidade de mão de obra com certo grau de especialização. Isso permite a criação de procedimentos padrão e instrumentos, como a definição de gabaritos padronizados, que facilitam a execução das atividades. Conforme San Martin (1999), quanto maior o grau de padronização dos elementos construtivos empregados pela tecnologia, maior será a padronização dos componentes e métodos de trabalho, bem como a redução do número de etapas da obra. Assim, quanto mais componentes e elementos construtivos padronizados forem empregados na produção, maior será o cumprimento desses requisitos.

A avaliação da padronização das operações e dos elementos construtivos nesse subprocesso consistiu na simulação do fluxo produtivo de corte e fixação das placas cimentícias, a partir dos painéis de vedação propostos no estudo de caso. Os resultados da proposta inicial dos painéis, anterior à quantificação das perdas de material, são comparados aos resultados da proposta final, após a definição dos módulos dos painéis de vedação vertical do sistema. Essa comparação é baseada nos resultados obtidos por meio da análise das atividades operacionais dentro do fluxo de produção, em que é relacionado o número total das operações que são realizadas mais de uma vez ao número total de operações exigidas no ciclo de produção do subprocesso.

Na proposta inicial, não foi definido um padrão para a aplicação das placas cimentícias nos painéis de vedação. A paginação foi definida seguindo as recomendações de espaçamento de 15 centímetros em relação ao encontro de placas OSB e o recorte em formato “C” nas regiões com aberturas nos painéis. A partir da simulação da aplicação das placas nos painéis de vedação foi identificada uma grande variação de recortes, resultando na criação de sete diferentes formatos de placas para revestimento de um único painel (Figura 32).

Figura 32 – Proposta inicial de revestimento em placa cimentícia em painel de vedação com aberturas

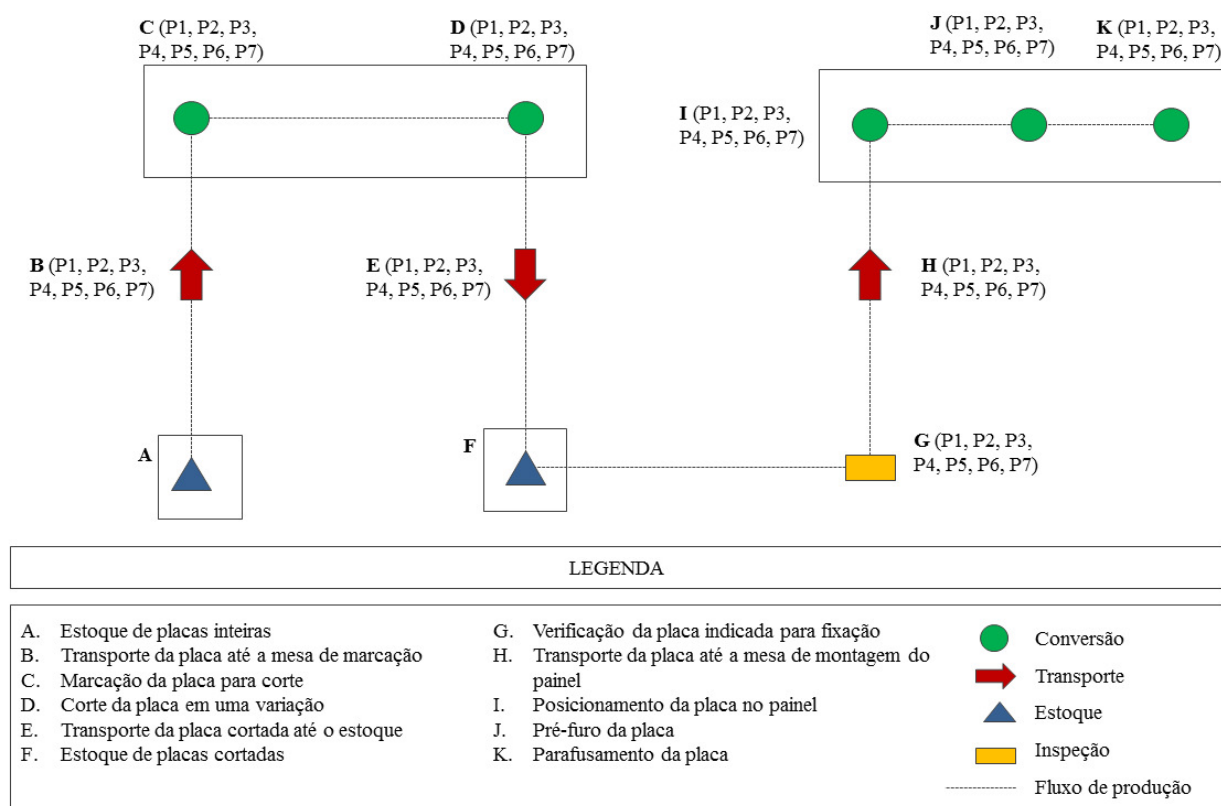


Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

Para revestimento dos painéis nessa proposta, são utilizadas sete placas cimentícias inteiras, sendo que seis placas são recortadas devido a aberturas no painel para instalação de esquadrias e uma é cortada em seção inferior para o fechamento da extremidade restante de painel, conforme paginação. Essa variação de formatos demanda grande quantidade de atividades de medição e corte das placas. A dificuldade na execução dos cortes é aumentada devido a grande quantidade de informações necessárias para a marcação das dimensões desses recortes. Além disso, a grande variedade de placas também demanda maior complexidade na manutenção dos estoques e na identificação das diferentes placas para posterior fixação no painel correspondente.

Uma vez que as placas aplicadas no painel apresentam dimensões diferentes entre si, é necessária a realização de todas as etapas do subprocesso para a cada placa utilizada. Ou seja, devido à necessidade de personalização, cada uma das placas cimentícias é transportada, marcada e cortada individualmente. Além disso, o transporte dessas placas é dificultado devido às grandes dimensões e peso, que impossibilitam o transporte de mais de uma placa por vez, aumentando as atividades de transporte. O fluxo desse subprocesso é representado na Figura 33, por meio de um mapofluxograma.

Figura 33 – Fluxo do subprocesso de produção da proposta inicial de revestimento em placas cimentícias



Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

A partir do mapeamento desse subprocesso, foi possível observar que é realizado um total de 63 (sessenta e três) atividades para o revestimento de um painel de vedação em placa cimentícia. Essas atividades correspondem a 9 (nove) operações diferentes no processo. As atividades que se repetem correspondem ao transporte (B, E, H), pré-furos (J) e parafusamento (K) das placas, resultando em 35 (trinta e cinco) atividades. As demais atividades são personalizadas, uma vez que cada placa exige marcações, recortes e identificações diferentes. Dessa forma, é alcançado um índice de aproximadamente 0,55 para o indicador “grau de padronização das operações (GPO)” proposto por San Martin (1999).

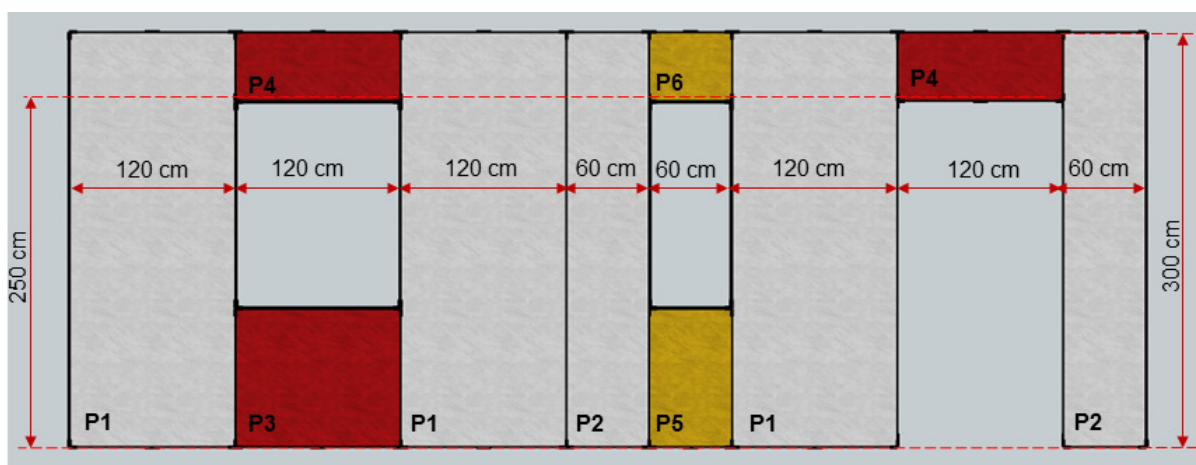
Valores de GPO próximos de um indicam uma maior incidência de repetições de atividades dos operários (SAN MARTIN, 1999). Assim, quanto maior a incidência de repetições, maior o grau de padronização de operações estabelecido. No subprocesso analisado, as operações padronizadas correspondem a 55% das atividades do processo de corte e fixação das placas cimentícias.

A análise das dependências internas do subprocesso permitiu avaliar as interdependências de processos. A quantidade total de dependências no mapeamento corresponde 28 (vinte e oito) ocorrências, referentes aos pré-requisitos para realização de determinadas atividades. O corte das placas, por exemplo, depende de uma marcação prévia, bem como o parafusamento das placas no quadro depende da conclusão da etapa de pré-furo. Assim, com base na relação entre as dependência identificadas e o total de atividades realizadas, é alcançado um índice de aproximadamente 0,56 para o indicador “grau de interdependência de processos (GIP)” proposto por San Martin (1999).

Valores de GIP valores próximos de um são relativos a um número menor de dependências em relação ao número total de atividades, e um valor próximo de zero é relativo à condição inversa (SAN MARTIN, 1999). Assim, quanto menos a incidência de dependências, menor o grau de interdependência estabelecido entre as operações.

As mesmas análises foram realizadas em relação à paginação das placas cimentícias da proposta final do estudo de caso. Nessa proposta, foi definida uma formatação padrão para as placas aplicadas nas regiões com aberturas nos painéis, conforme descrito no tópico 5.1.2.

Figura 34 - Proposta final de revestimento em placa cimentícia em painel de vedação com aberturas



Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

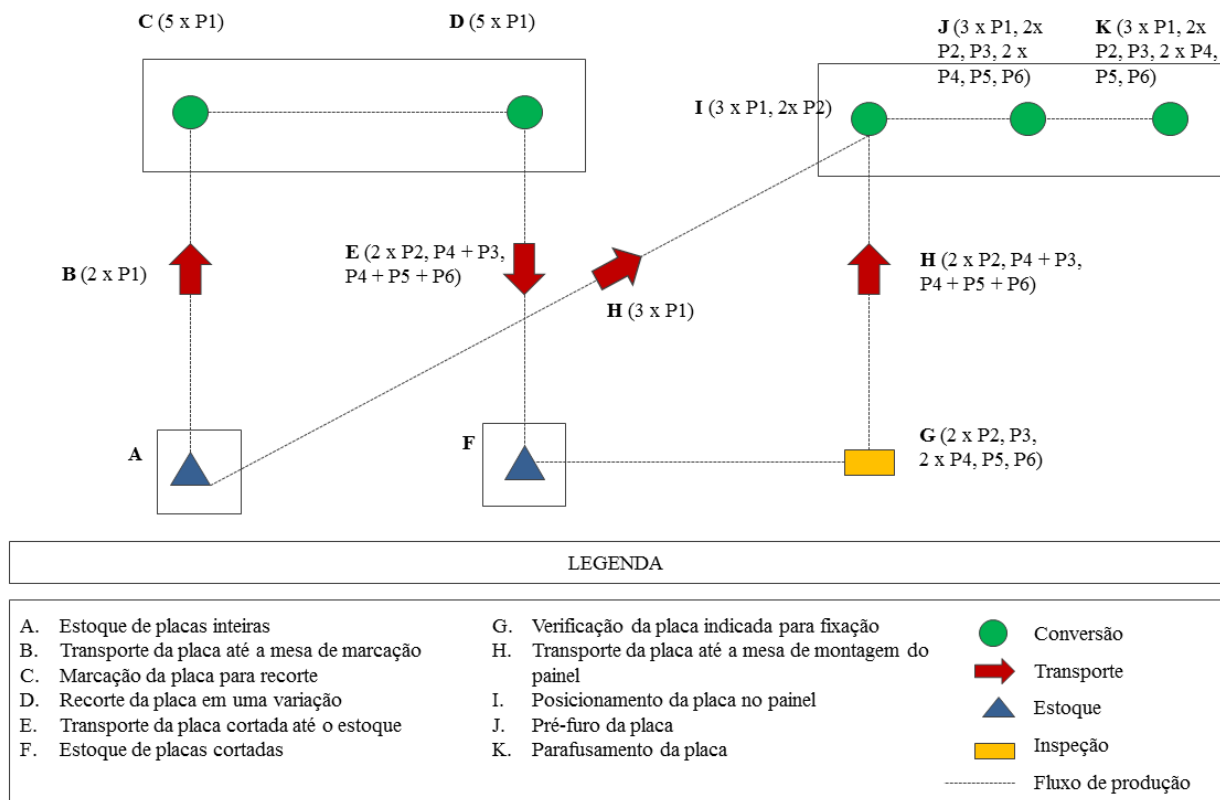
Nesse caso, a altura do peitoril da janela foi alterada para 100 centímetros e a altura das janelas foi fixada em 150 centímetros, restando 50 centímetros de altura na área superior abertura. Assim, para revestimento dos painéis nessa proposta, são utilizadas integralmente seis placas cimentícias. Para aplicação nas áreas com aberturas para janelas de 120 centímetros de largura, é utilizada meia placa para o fechamento do peitoril e da área superior

de cada abertura ($P4 + P3$). Nas aberturas para janelas de 60 centímetros de largura, é utilizado um quarto de uma placa inteira para o mesmo fim ($P5 + P6$). Na abertura para portas de 120 centímetros, é utilizada uma seção que corresponde a um sexto de uma placa inteira ($P4$).

Assim, ao final da fixação das placas, ocorre perda correspondente a uma placa no formato “P6”, que poderá ser utilizada em outro painel com abertura para janela de 60 centímetros. Além de reduzir a perda de material, a padronização proposta reduz a quantidade de marcações e cortes necessários nas placas para aplicação nos painéis. Isso ocorre porque são utilizadas seções de uma mesma placa, em que uma seção resulta do corte de outra.

O transporte dessas placas pode ser facilitado, uma vez que são propostas seções menores. Dessa forma, o peso do material a ser manipulado é reduzido, o que possibilita o transporte de mais de uma placa por vez, diminuindo as atividades de transporte. O fluxo desse subprocesso é representado na Figura 35, a partir de um mapofluxograma.

Figura 35 – Fluxo do subprocesso de produção da proposta final de revestimento em placas cimentícias



Fonte: Elaborada pelo autor, 2015.

A partir do mapeamento do processo, foi possível observar que é realizado um total de 55 (cinquenta e cinco) atividades para o revestimento de um painel de vedação em placa cimentícia. Essas atividades correspondem a 9 (nove) operações diferentes no processo. As atividades que se repetem podem ser identificadas em todas as operações do processo, resultando em 46 (quarenta e seis) atividades. Dessa forma, para o indicador do grau de padronização das operações proposto por San Martin (1999) é alcançado um índice de aproximadamente 0,83. Assim, no subprocesso analisado, as operações padronizadas correspondem a 83% das atividades do processo de corte e fixação das placas cimentícias.

A quantidade total de dependências no mapeamento corresponde 25 (vinte e cinco) ocorrências, referentes aos pré-requisitos para realização de determinadas atividades. Assim, com base na relação entre as dependência identificadas e o total de atividades realizadas, é alcançado um índice de aproximadamente 0,55.

Com base nesses resultados, pode-se observar que a aplicação dos indicadores permitiu quantificar o grau de simplificação alcançado após a proposta de padronização dos componentes construtivos. A partir da aplicação do indicador GPO, foi possível demonstrar que a padronização dos componentes construtivos aumenta o grau de padronização das operações do processo produto.

A padronização dos componentes construtivos possibilita manter estoques maiores, de modo a reduzir os impactos das interdependências causadas pelos subprocessos. Nesse sentido, a padronização e repetição de módulos de painéis favorece a padronização dos componentes, minimizando os impactos causados pelos subprocessos necessários para a diferenciação dos painéis. Dessa forma, a modulação do produto mostra-se uma estratégia eficiente, para a simplificação do processo de produção dos painéis, quando aliada à padronização dos componentes construtivos.

A modularidade aplicada ao produto pode apresentar uma maior contribuição para a simplificação quando adotado um processo de produção modular. A produção modular separa a composição de produtos finais em partes ou componentes, em que alguns desses componentes são comuns a todas as opções de produtos. Dessa forma, é possível identificar mais facilmente problemas de produção e isolar outras situações que representem problemas de qualidade em potencial (FEITZINGER; LEE, 1997). Nessa abordagem, pode ser priorizada a montagem sequencial de módulos iguais e de uma mesma família, ao contrário da definição de uma sequência de produção que segue a sequência de montagem do produto no local da obra.

Dessa forma, as interdependências podem ser minimizadas pela padronização e modularidade do produto, uma vez que permitem um fluxo de produção com o mínimo de interrupções e necessidade de alterações. Contudo, para isso seria necessário prever estoques de painéis, organizados em família, para posterior posicionamento desses elementos dentro do caminhão na sequência de montagem dos painéis no local da obra. Isso pode resultar em mais interdependências no processo, sendo necessário um maior número de atividades de inspeção e transporte desses elementos. Assim, as vantagens e as perdas relacionadas à adoção dessa abordagem devem ser investigadas.

6 DIRETRIZES DE PROJETO DO PRODUTO

O presente trabalho apresenta como resultado principal a definição de diretrizes de projeto para reduzir perdas na produção de painéis de vedação pré-fabricados em sistemas industrializados de construção a seco, que contemplem os princípios da customização em massa. Essas diretrizes têm como objetivo apoiar as decisões para redução de perdas da produção em massa de EHIS customizadas e pré-fabricadas em sistema LWF, uma vez que os recursos para a produção dessas habitações são limitados.

As definições de projeto e os indicadores a serem adotados possibilitam orientar a redução de perdas pela simplificação do produto e do processo produtivo, por meio da modulação e padronização dos elementos construtivos durante as etapas de desenvolvimento do produto. Dessa forma, é possível evitar a perda de recursos investidos na tecnologia construtiva que possam inviabilizar a consolidação de EHIS e o atendimento à customização em massa. Na sequência, são discutidos os principais resultados encontrados e apresentadas as diretrizes de projeto para a produção em massa de painéis de vedação vertical pré-fabricados em sistemas de construção a seco.

6.1 Proposta de diretrizes de projeto para a redução de perdas na produção em massa de painéis de vedação em sistemas de construção a seco

Uma vez que a racionalização depende do planejamento, o projeto do produto deve buscar a padronização na formatação dos elementos e componentes do sistema. A definição das dimensões dos painéis modulares deve seguir uma modulação compatível às dimensões dos componentes do sistema construtivo. Dessa forma, a modulação deve garantir a integridade e o máximo aproveitamento dos componentes que possuem alto valor agregado. Além disso, alterações na linha de produção podem causar aumento do grau de interdependência dentro do processo de fabricação dos painéis e, portanto, menor simplificação do processo. Esta característica pode levar à redução da produtividade e geração de estoques intermediários. Assim, pequenas diferenças na composição da estrutura e nas dimensões totais dos módulos de painéis podem causar impactos na produção em fábrica.

A utilização de uma modulação permite criar elementos modulares padronizados, de modo a aumentar o aproveitamento do módulo da composição do produto. Ou seja, uma vez

que todos os painéis são múltiplos, maior a possibilidade de repetição desses elementos modulares e de alcançar níveis mais altos de modularidade do produto, especialmente para a composição dos elementos de customização. A redução da variedade de painéis que serão produzidos em fábrica favorece a simplificação do produto e pode aumentar a racionalização do processo construtivo quando combinada à padronização dos componentes construtivos que os compõem. Nesse sentido, os painéis com configurações semelhantes podem ser readequados para permitir a composição da edificação a partir de um número reduzido de módulos. A caracterização dos módulos propostos permite a visão global de todos os elementos modulares e de sua composição. Isso permite identificar mais facilmente alternativas para adequação dos módulos, possibilitando um melhor aproveitamento dos mesmos. Além disso, a caracterização orienta a criação de famílias de módulos que possibilitem a simplificação do produto e do processo produtivo.

Para permitir a identificação de painéis semelhantes e as possibilidades de repetição, a caracterização deve considerar principalmente as dimensões de largura e altura, os tipos de aberturas (portas e janelas) e os tipos de interfaces entre os painéis. Com base nessas observações, pode-se concluir que o elemento modular a ser produzido na fábrica corresponde à composição formada pelo quadro estrutural (perfis de madeira) e fechamento com placa OSB. As instalações hidrossanitárias e elétricas, bem como as placas de revestimento interno (placa de gesso acartonado) e externo (placa cimentícia) dos painéis, correspondem às diferenciações nos painéis dentro de uma família de produtos. Portanto, uma família tem como módulo básico o quadro estrutural com fechamento em placa OSB e os demais módulos derivam deste, a partir de diferenciações quanto às instalações e às placas de revestimento.

Nesse contexto, a aplicação dos indicadores para avaliação da modularidade do produto permite avaliar se um melhor nível de aproveitamento dos módulos foi alcançado, com base nas adequações para reduzir a quantidade de elementos modulares diferentes e possibilitar o aumento do número de usos de cada módulo nas variantes do produto.

As diretrizes de projeto propostas são apresentadas na sequência e divididas em duas categorias conforme o processo de desenvolvimento do produto. A primeira categoria apresenta caráter mais genérico, voltada para a aplicação da modulação no desenvolvimento dos elementos modulares, e a segunda categoria, de caráter específico, é direcionada à padronização dos componentes modulares de sistemas de construção a seco: (a) diretrizes de projeto para a modulação dos painéis de vedação e simplificação do produto; (b) diretrizes de projeto para padronização dos componentes modulares dos painéis de vedação em sistemas de construção a seco.

6.1.1 Diretrizes de projeto para a modulação dos painéis de vedação e simplificação do produto

As medidas de eficiência e controle de perdas são focadas no controle do processo produtivo dos elementos construtivos e da edificação, que envolve a produção fábrica e a logística de transporte e montagem da edificação no local da obra. O projeto do produto deve considerar especificidades da produção durante o seu desenvolvimento, de modo a minimizar impactos negativos no processo produtivo.

Com base nos resultados obtidos no estudo de caso e na etapa de avaliação da pesquisa foram propostas diretrizes para a definição dos espaços internos e dos elementos modulares para pré-fabricação em massa em sistemas de construção a seco. A modulação dos painéis de vedação considerou ainda os princípios da customização em massa de produtos. Assim, dentre as orientações que favorecem a redução de perdas encontram-se:

- Definir as opções de customização nas etapas iniciais do desenvolvimento do produto. Essas opções devem ser consideradas na modulação do produto e na definição dos módulos de painéis;
- Definir as dimensões dos elementos modulares (painéis de vedação) a partir de uma modulação compatível às dimensões dos componentes do sistema construtivo e às restrições quanto à definição das áreas internas da edificação. Assim, a partir da definição dos painéis, as áreas internas dos ambientes ficam condicionadas às medidas derivadas da modulação adotada. A adoção de uma modulação múltipla ou submúltipla das dimensões dos componentes construtivos para a composição dos elementos modulares reduz a necessidade de recortes e perdas e aumenta o aproveitamento de material para a composição de outros módulos. Nesse sentido, a modulação definida deve priorizar o aproveitamento de componentes inteiros, evitando recortes;
- Definir a delimitação possível de cada painel, conforme o comprimento do painel (distância entre as extremidades no eixo horizontal), para divisão do produto em elementos modulares;
- Delimitar os elementos modulares nas máximas dimensões possíveis, abrangendo maiores áreas do produto, de modo a minimizar a quantidade de processos e transportes na produção em fábrica e na montagem dos painéis no local da obra;

- Utilizar dimensões compatíveis às restrições de capacidades dos equipamentos utilizados no processo produtivo, na delimitação dos elementos modulares. Assim, devem ser consideradas, principalmente, as limitações de transporte dos painéis (capacidade máxima do caminhão, dos equipamentos utilizados na produção em fábrica e dos equipamentos utilizados na montagem da edificação no local da obra);
- Reduzir a variedade de tamanhos dos elementos modulares que compõem o produto, de modo que minimizem impactos na linha de produção, uma vez que cada tamanho diferente de painel exige novas marcações para o seu posicionamento nas máquinas industriais;
- Avaliar o potencial de repetição dos elementos modulares propostos. Identificar dentre os elementos modulares definidos, aqueles com características iguais ou similares nas dimensões e na composição do quadro estrutural, no posicionamento das aberturas, na presença de instalações e nos tipos de revestimentos. Os painéis semelhantes podem ser reajustados, de modo a se tornarem iguais, reduzindo a quantidade de elementos modulares diferentes e priorizando a repetição desses elementos na composição do produto. Os ajustes dimensionais para readequação e padronização dos painéis devem respeitar a modulação definida. Nessa etapa, pode ser utilizado o protocolo de caracterização para facilitar a visualização e a comparação entre os módulos propostos;
- Reduzir a variedade de esquadrias utilizadas no produto, padronizando as dimensões das aberturas. Dessa forma, a variedade nas dimensões das aberturas dos painéis é minimizada, reduzindo também a quantidade de atividades necessárias no subprocesso de produção dos quadros de esquadrias;
- Suprimir pontos elétricos em painéis com poucas ocorrências e realocar esses pontos para outros painéis com maior número de utilização, conforme limitações de *layout* do projeto do produto;
- Restringir a variação de painéis que contenham instalações hidráulicas. Se possível, definir um painel único que comporte todas as instalações hidráulicas previstas para a habitação.

6.1.2 *Diretrizes de projeto para padronização dos componentes modulares dos painéis de vedação em sistemas de construção a seco*

O projeto do produto deve buscar a padronização nos formatos dos componentes do sistema, de modo a favorecer a simplificação do produto e, conseqüentemente, do processo produtivo dos elementos modulares. As diretrizes propostas têm como foco a padronização na utilização dos componentes dos painéis de vedação, com base nos resultados do estudo de caso e nas recomendações dos manuais. Essas diretrizes são específicas para a aplicação no desenvolvimento de projetos de edificações pré-fabricadas em sistemas de construção a seco para produção em massa. Dessa forma, dentre as orientações que favorecem a redução de perdas encontram-se:

- Seguir a orientação vertical na instalação das placas nos painéis de vedação, para o melhor aproveitamento desses componentes. As placas devem ser instaladas, preferencialmente, em suas dimensões máximas de largura (120 cm) e, quando necessário, cortadas em variações de 30, 60 e 90 cm. Nesse caso, devem ser identificadas as possibilidades de aproveitamento dos recortes de placas na composição de outros painéis, de modo a garantir a utilização integral das placas consumidas. Contudo, quanto maior a variedade de formatos das placas, maior a complexidade dos elementos modulares e maior a quantidade de atividades necessárias na sua produção;
- Adotar um valor submúltiplo da modulação adotada para o desenvolvimento produto para definição da espessura dos painéis. As placas de vedação e os montantes devem ser coordenados dimensionalmente para alcançar a espessura de painel desejada. Nesse caso, deve-se verificar a relação dos custos unitários dos materiais, de modo a definir se é mais favorável utilizar placas de maior espessura ou aumentar a seção transversal dos montantes;
- Definir interfaces padronizadas ou uma interface padrão para a ligação entre os painéis, de modo a reduzir as variações existentes e simplificar a configuração dos painéis de vedação. A criação de uma interface padrão possibilita interações entre um número maior de painéis, favorecendo um maior aproveitamento dos módulos de painéis;

- Prever na modulação dos painéis e na aplicação das placas de vedação que o espaçamento entre os eixos dos montantes seja menor no início do painel, uma vez que a primeira placa é fixada na dimensão inteira do montante;
- Posicionar as aberturas nos painéis de modo a aproveitar os montantes estruturais existentes, evitando a adição de mais montantes para a composição da estrutura das aberturas;
- Prever o deslocamento dos montantes e umbrais na composição da estrutura das aberturas dos painéis, para que as dimensões livres dos vãos das aberturas sejam compatíveis com a modulação adotada no desenvolvimento do produto. Essa medida visa garantir a compatibilidade entre as dimensões das placas de vedação com a área que deverá ser revestida nos painéis com aberturas. Nesse sentido, a altura do peitoril e da altura das aberturas para instalação de janelas, ou seja, a posição das vergas e contravergas, também devem seguir a modulação adotada, de modo a evitar recortes que não possam ser reaproveitados no fechamento de outros painéis com aberturas;
- Padronizar o formato dos recortes das placas OSB para aplicação nas regiões das aberturas dos painéis, de modo que o mesmo formato do recorte em “C” seja aplicado em ambas as laterais da abertura e em ambos os lados do painel. Dessa forma, deve-se prever o recorte das placas OSB em formato “C” de forma que o centro da placa que corresponde à área recortada coincida com o início da abertura no painel. Assim, a extremidade do recorte da placa deve coincidir com o centro da abertura;
- Iniciar o projeto de paginação dos componentes de vedação pelas chapas OSB a partir das áreas com aberturas, ou seja, a sequência de paginação das placas OSB parte das placas instaladas nas áreas com aberturas. Iniciar o projeto de paginação das placas cimentícias e de gesso acartonado a partir das áreas com aberturas, uma vez que essas placas são instaladas lateralmente às aberturas. Nesse caso, deve ser prevista a realização de junta aparente nas placas cimentícias instaladas lateralmente às esquadrias conforme especificações técnicas do fabricante, ou outra solução para absorção das tensões ocasionadas pelas movimentações térmicas e higroscópicas.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho se propôs a estabelecer diretrizes de projeto que possibilitem a redução de perdas no emprego de sistemas de construção a seco na produção de painéis de vedação vertical, pré-fabricados, que contemplem os princípios da customização em massa. As diretrizes propostas orientam a configuração de elementos modulares (painéis) para a simplificação do produto, por meio do melhor aproveitamento dos módulos e dos componentes utilizados. A simplificação do produto tem como objetivo a redução das perdas no processo produtivo dos painéis, com base os princípios de Arquitetura e Modularidade do Produto.

Os resultados obtidos permitem concluir que a análise do consumo e das perdas de material, durante o desenvolvimento do produto, possibilitou a avaliação dos impactos das decisões de projeto no aproveitamento dos materiais utilizados, bem como rever decisões de projeto que resultariam em maiores perdas de material. Assim, a quantificação do consumo e das perdas dos componentes dos painéis de vedação permitiu identificar potenciais áreas de melhoria e as principais causas de perda de material no produto proposto.

O aproveitamento dos materiais aplicados deve ser observado e quantificado durante as etapas iniciais de desenvolvimento do produto. Dessa forma, é possível potencializar a redução da variedade de tipos, do consumo e das perdas de material, devido a problemas de compatibilização dimensional. Por se tratar de um sistema construtivo industrializado, em que os materiais apresentam maior valor agregado, essas perdas representam impacto significativo no custo para produção em massa e não agregam valor ao produto. Assim, a adoção de soluções técnicas que eliminem as perdas ou permitam o reaproveitamento dos materiais em outras partes do produto possibilitam agregar valor ao produto final.

A adoção dos princípios de modularidade do produto contribuiu para simplificação do produto e a padronização dos elementos modulares (painéis de vedação), permitindo maior flexibilidade no atendimento às opções de customização. As análises referentes à modularidade do produto permitiram a redução das variações dos módulos propostos, orientando as decisões de projeto em relação ao aproveitamento dos painéis, de modo que pudessem ser repetidos em mais áreas da habitação. Essas decisões foram convertidas em diretrizes de projeto, com foco na redução de perdas, para orientar o desenvolvimento de painéis de vedação para pré-fabricação em massa em sistemas de construção a seco.

A análise da modularidade do produto proposto, por meio da aplicação de indicadores, possibilita identificar a ocorrência de uma grande quantidade de módulos diferentes, que se repetem poucas vezes para compor as variantes do produto. Os resultados obtidos podem orientar a revisão dos módulos propostos, de modo a reduzir a quantidade de elementos modulares diferentes, e possibilitar o aumento do número de usos de cada módulo nas variantes do produto. As alterações baseadas nas análises realizadas na presente pesquisa resultaram em um índice mais alto de aproveitamento dos módulos, permitindo alcançar uma maior economia de escopo e potencializar a simplificação do processo produtivo. O mesmo pode ser adotado na definição das interfaces, de forma a orientar a redução das variações de tipos existentes e simplificar a configuração dos módulos.

Com base nesses resultados, pode-se observar que a aplicação dos indicadores permitiu quantificar o grau de padronização das operações e o grau de interdependência dos processos, de modo a orientar a tomada de decisões para o aumento da simplificação dos processos. A padronização dos componentes construtivos aumenta o grau de padronização das operações do processo produto. A utilização de componentes e elementos padronizados pode minimizar a necessidade de mão de obra com alto grau de especialização, permitindo a criação de procedimentos padrão e instrumentos que facilitem a execução das atividades. Dessa forma, a modulação do produto, aliada a padronização dos componentes construtivos, mostra-se uma estratégia eficiente para simplificação do processo de produção dos painéis de vedação vertical pré-fabricados em sistema de construção a seco.

7.1 Sugestões para estudos futuros

Sugere-se como foco de pesquisas futuras relacionadas ao tema abordado:

- Aplicação das diretrizes propostas em uma gama de tecnologias de edificações e de contextos mais ampla;
- Proposta de diretrizes de modulação de outros subsistemas (pisos, cobertura, instalações) de elementos pré-fabricados em sistemas construtivos industrializados;
- Desenvolvimento de outros indicadores para o aprimoramento da avaliação e do desenvolvimento de produtos modulares;

- Desenvolvimento de estudos que verifiquem aplicabilidade da Arquitetura e Modularidade do Produto em processos de produção modular;
- Investigação de outras condicionantes relacionadas a produção e montagem de painéis pré-fabricados em sistemas construtivos industrializados.
- Investigação quanto às vantagens e as perdas relacionadas manutenção de estoques organizados em famílias de painéis, para posterior posicionamento desses elementos dentro do caminhão na sequência de montagem dos painéis no local da obra.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. NBR 12498: Madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento, para uso geral - Dimensões e lotes. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, 1991. 6.
- ABNT. NBR 15873: Coordenação modular para edificações. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT. NBR 15575-1: Edifícios habitacionais - Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, 2013.
- ARAUCO. Ingeniería y Construcción en Madera, Santiago, Chile, 2002.
- AWC. **Details for Conventional Wood frame Construction**. Washington: American Forest & Paper Association, 2001. 52 p. Disponível em: <<http://www.awc.org/pdf/wcd1-300.pdf>>. Acesso em: junho 2014.
- BRASILIT. Manual técnico de placas cimentícias, São Paulo, 2006.
- CONSULSTEEL. Construcción con acero leviano: Manual de procedimiento, Buenos Aires, 2002. 257.
- DUARTE, R. B. Elementos de Avaliação da Industrialização na Construção por Sistemas no Rio Grande do Sul. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 1982. 165.
- DURAY, R. et al. Approaches to mass customization: configurations and empirical validation. **Journal of Operations Managements**, 18, 2000. 605-625.
- ETERNIT. Catálogo técnico - Placa Cimentícia. **Soluções construtivas Eternit**, São Paulo, 2005. 23.
- FABRÍCIO, M. M. Industrialização das construções: uma abordagem contemporânea. **Texto (Livre-Docência), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo**, São Carlos, 2008. 126.
- FEITZINGER, E.; LEE, H. L. Mass customisation at Hewlett-Packard: The power of postponement. **Harvard Business Review**, 1997. 116–123.
- FIREMAN, M. C. T. Proposta de método de controle integrado produção e qualidade, com ênfase na medição de perdas por making-do e retrabalho. **Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 2012. 208.
- FIXSON, S. K. The Multiple Faces of Modularity – A Literature Analysis of a Product Concept for Assembled Hardware Products. **Technical Report 03-05**, June 2003. 88.
- FIXSON, S. K. Product architecture assessment: A tool to link product, process, and supply chain. **Journal of Operations Management**, 2005. 345–369.

FORMOSO, C. T. et al. As perdas na construção civil: conceitos, classificações e seu papel na melhoria do setor, Porto Alegre, 1996.

FORMOSO, C. T. et al. Material Waste in Building Industry: Main Causes and Prevention. **Journal of Construction Engineering and Management**, 128, 1 August 2002.

FRANCO, L. S. Aplicação de diretrizes de racionalização construtiva para a evolução tecnológica dos processos construtivos em alvenaria estrutural não armada. **Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, São Paulo, 1992. 319.

FRANCO, L. S.; AGOPYAN, V. Racionalização dos processos construtivos em alvenaria estrutural não armada. **Proceedings of the 5th International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries**, Florianópolis, SC, 1994. p. 497-508.

FREITAS, A. M. S.; CRASTO, R. C. M. Steel Framing: Arquitetura. In: SANTIAGO, A. K. **Série Manual de Construção em Aço**. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA, 2012. p. 151.

GREVEN, H. A.; BALDAUF, A. S. F. Introdução à Coordenação Modular da Construção no Brasil: Uma abordagem atualizada. **Coleção Habitare/FINEP**, Porto Alegre, 2007.

HALMAN, J. I. M.; VOORDIJK, J. T.; REYMEN, I. M. M. J. Modular approaches in Dutch house building. **Housing Studies**, 2008. 781–799.

HOFMAN, E.; VOORDIJK, H.; HALMAN, J. Matching supply networks to a modular product architecture. **Building Research and Information**, 2009. 31–42.

ISHIWATA, J. **IE for the shop floor: productivity through process analysis**. Portland: Productivity Press, 1991. 182 p.

KOSKELA, L. An exploration towards a production theory and its application to construction. **Tese (Doctor of Philosophy) - VTT Technical Research Centre of Finland, Helsinki University of Technology**, Espoo, 2000. 298.

KOSKELA, L. Making-do – The Eighth Category of Waste. **Conference of the International Group for Lean Construction**, Dinamarca, 12, 2004.

LENNARTSSON, M.; BJÖRNFOT, A. Step-by-Step Modularity – a Roadmap for Building Service Development. **Lean Construction Journal**, 2010. 17-29.

LPBRASIL. Catálogo técnico OSB: Placas estruturais para construção CES. **LP Building Products**, Curitiba, 2011. 8.

LPBRASIL. **Manual CES - Construção Energética Sustentável**. Curitiba: [s.n.], 2011. Disponível em: <<http://www.lpbrasil.com.br>>. Acesso em: Março 2014.

LUCA, C. R. D. et al. Manual de projetos de sistemas Drywall: Paredes, forros e revestimentos. **Associação Brasileira dos Fabricantes de Chapas para Drywall**, São Paulo, 2006.

LUKKA, K. The Constructive Research Approach. **In: OJALA, L.; HILMOLA, O.-P. (Eds.). Case Study Research in Logistics. Turku School of Economics and Business Administration. Series B 1**, Turku, 2003. p. 83-101.

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Sistema construtivo em “wood frame” para casas de madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 31, n.2, Londrina, Dezembro 2010. 143-156.

O’CONNOR, J. T.; DAVIES, V. S. Constructability improvement during field operations. **Journal of Construction Engineering and Management**, 114, Dec 1988. 548-64.

OHNO, T. O Sistema Toyota de Produção – Além da produção em larga escala, Porto Alegre, 1997. 149.

PILLER, F.; KUMAR, A. For each, their own: The strategic imperative of mass customization. **Industrial Engineer**, 38, 2006. 40–45.

PIMMLER, T. U.; EPPINGER, S. D. Integration analysis of product de-compositions. **In Proceedings of the ASME Conference on Design Theory and Methodology**, Minneapolis, MN, USA, 1994. 343–351.

PINE, B. J. . I. Mass Customizing Products and Services. **Strategy Leadersh**, 1993. 6–55.

ROCHA, C. G. D.; FORMOSO, C. T.; TZORTZOPOULOS, P. Adopting Product Modularity in House Building to Support Mass Customisation. **Sustainability**, 2015. 4919-4937.

ROCHA, C. G. D.; KEMMER, S. L. Method to Implement Delayed Product Differentiation in Construction of High-Rise Apartment Building Projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, 139, 2013.

SABBATINI, F. H. Desenvolvimento de métodos, processos e sistemas construtivos: formulação e aplicação de uma metodologia. **Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo**, São Paulo, 1989. 321 p.

SALVADOR, F. Toward a Product System Modularity Construct: Literature Review and Reconceptualization. **IEEE Transactions on Engineering Management**, 2007. 219–240.

SALVADOR, F.; FORZA, C.; RUNGTUSANATHAM, M. Modularity, product variety, production volume, and component sourcing: Theorizing beyond generic prescriptions. **Journal of Operations Management**, 2002. 549–575.

SAN MARTIN, A. P. Método de Avaliação de Tecnologias de Edificação para a Habitação de Interesse Social sob o Ponto de Vista da Gestão dos Processos de Produção. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 1999. 140.

SANTIAGO, A. K.; FREITAS, A. M. S.; CRASTO, R. C. M. D. Steel Framing: Arquitetura. **In: SANTIAGO, A. K. Série Manual de Construção em Aço**. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA, 2012. p. 151.

SANTOS, A. Application of flow principles in the production management of construction sites. **Tese (PhD) - School of Construction and Property Management, The University of Salford**, Salford, UK, October 1999. 463.

SILVA, M. G.; SILVA, V. G. Steel Framing: Painéis de vedação. In: _____ **Série Manual de Construção em Aço**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2004. p. 59.

SINAT. Diretriz SINAT nº 005 - Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “Light Wood Framing”). **Diretrizes para Avaliação Técnica de Produtos**, Brasília, Setembro 2011. 56.

SOIBELMAN, L. As perdas de materiais na construção de edificações: sua incidência e seu controle. **Dissertação (mestrado), Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 1993.

SOMMER, L. Contribuições para um método de identificação de perdas por improvisação em canteiros de obra. **Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 2010. 142.

ULRICH, K. The role of product architecture in the manufacturing firm. **Research Policy**, 1995. 419–440.

VEENSTRA, V. S.; HALMAN, J. I. M.; VOORDIJK, J. T. A methodology for developing product platforms in the specific setting of the housebuilding industry. **Research in Engineering Design**, 2006. 157–173.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e método**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 205 p.