



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

VICTOR MIRANDA OLIVEIRA

**MODULARIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL BRASILEIRA:
RACIONALIDADE DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM EM
SISTEMA MODULAR EM TIMBERFRAME**

Londrina
2021

VICTOR MIRANDA OLIVEIRA

**MODULARIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL BRASILEIRA:
RACIONALIDADE DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM EM
SISTEMA MODULAR EM TIMBERFRAME**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina como requisito para a obtenção do título de Mestre Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Daniel de Melo Moura

Londrina
2021

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

O48m Oliveira, Victor Miranda.
MODULARIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL BRASILEIRA :
RACIONALIDADE DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM EM SISTEMA
MODULAR EM TIMBERFRAME / Victor Miranda Oliveira. - Londrina, 2022.
108 f. : il.

Orientador: Jorge Daniel de Melo Moura.
Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Estadual
de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo, 2022.
Inclui bibliografia.

1. sistema estrutural em madeira - Tese. 2. timberframe - Tese. 3.
racionalidade - Tese. 4. metodologia de projeto - Tese. I. Moura, Jorge Daniel de
Melo. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo.
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

CDU 711/72

VICTOR MIRANDA OLIVEIRA

**MODULARIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL BRASILEIRA:
RACIONALIDADE DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM EM
SISTEMA MODULAR EM TIMBERFRAME**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina como requisito para a obtenção do título de Mestre Arquitetura e Urbanismo.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Jorge Daniel de Melo
Moura
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Profa. Dra. Akemi Ino.
IAU Universidade de São Paulo – USP/São
Carlos

Prof. Dr. Ricardo Dias da Silva.
Universidade Estadual de Maringá – UEM

Londrina, 16 de agosto de 2021.

OLIVEIRA, Victor Miranda. **Modularidade na construção civil brasileira: racionalidade de fabricação e montagem em sistema modular em timberframe**. 2021. 104 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

RESUMO

A indústria da construção civil apresenta um atraso em relação aos outros setores de produção em massa, porém há uma tendência para sua industrialização e utilização de estratégias da indústria de produção em massa como, por exemplo, a modularidade do produto e o design para manufatura e montagem. Entretanto, a construção se difere dos demais setores, e, ao implementar uma estratégia, esta pode trazer implicações para o processo produtivo, como na fabricação e montagem. Por esses motivos é importante estudarmos essa indústria mais atentamente. Em 2005, realizou-se o projeto mutante, um sistema estrutural modular em madeira, que buscava a sua máxima simplificação. Entretanto, esse projeto não foi submetido a um rigor teórico, por isso este trabalho visa revisitar o projeto mutante, buscando seu aprimoramento e estudar suas implicações no sistema estrutural. O problema que este trabalho visa estudar é como aumentar a racionalidade de um sistema estrutural timberframe baseado no projeto mutante no Brasil. O método implicará em simulações em software e construção de um protótipo em tamanho real e análise das várias etapas de produção das peças, montagem e desmontagem. Os resultados parciais, com base na simulação indicam o potencial de racionalidade do ponto de vista de fabricação e montagem/canteiro.

Palavras-chave: sistema estrutural em madeira; timberframe; racionalidade; modularidade do produto; madeira de reflorestamento; metodologia de projeto.

OLIVEIRA, Victor Miranda. **Modularity in Brazilian civil construction**: manufacturing and assembly rationality in a modular timberframe system. 2021. 104 p. Dissertation (Master in Architecture and Urbanism) - State University of Londrina, Londrina, 2021.

ABSTRACT

The civil construction industry shows a delay in the industrialization sector compared to others, nonetheless there is a tendency in the increase of industrialization and rationalization strategies of the production system as, for example, product modularity. Although, the civil construction industry is different from the other sectors, thus if we implement a new strategy it can affect the production process, such as assembly and transport. For that reason, it is important to study the civil construction industry closely. In 2005, a modular structural system in OSB was made, called projeto mutante. However, this structural system was not submitted to theoretical rigor, thus this paper seeks to revisit projeto mutante, looking to enhance and study its implications in this timber frame structural system. The method will imply in software simulations and the construction of a prototype in real size will be made. Partial results show a potential in rationality in manufacture and assembly.

Key words: timber frame; rationality; modularity; reforested wood; design method.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	QUESTÃO DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA	3
1.2	PRESSUPOSTO	7
1.3	OBJETIVO	8
2	REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1	CONCEITUAÇÃO: MODULARIDADE DO PRODUTO E MÓDULO	10
2.2	MODULARIDADE: ESTRATÉGIAS	13
2.2.1	Acoplamento Rígido e Flexível	13
2.2.2	Arquitetura Modular do Produto	16
2.2.3	Conclusão	17
2.3	MODULARIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL: DIFICULDADES E ESTRATÉGIAS... ..	18
2.3.1	Coordenação Modular	21
2.4	SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM MADEIRA NO BRASIL	22
2.5	PROCESSO DE MONTAGEM E FABRICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	25
2.5.2	A Relação entre Escala, Montagem e Fabricação dos Módulos	26
2.5.1	Design para Manufatura e Montagem (DFMA).....	31
2.6	ANÁLISE POR CATEGORIA	35
2.6	CONCLUSÃO DA REVISÃO DE LITERATURA.....	41
3	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	42
3.1	REFERÊNCIA.....	42
3.2	CONCEPÇÃO.....	44
3.3	CONCLUSÃO DO DESENVOLVIMENTO PROJETUAL E DAS SIMULAÇÕES EM SOFTWARE.....	50
4	EXPERIMENTO/PROTÓTIPO	50
4.1	PRIMEIRA ETAPA: PREPARAÇÃO E CATEGORIZAÇÃO DAS PEÇAS DE MADEIRA.....	51
4.2	SEGUNDA ETAPA: FABRICAÇÃO.....	56
4.2.1	Análise do Processo de Fabricação pela Banca de Especialistas	58
4.2.2	Análise do Tempo de Fabricação	65

4.2.2.1	Análise primeira etapa: alinhamento	66
4.2.2.2	Análise segunda etapa: fixação.....	67
4.2.2.2.1	<i>Módulos da base</i>	67
4.2.2.2.2	<i>Módulos do corpo</i>	68
4.2.3	Conclusão Processo de Fabricação	69
4.2.3.1	Impactos da modularidade e do DFMA	69
4.2.3.2	Escala do componente	70
4.2.3.3	Dificuldades e GAPs.....	70
4.3	TERCEIRA ETAPA: MONTAGEM.....	71
4.3.1	Processo de Montagem.....	75
4.3.2	Tempo de Montagem	82
4.3.3	Manuseio e Recursos.....	83
4.3.5	Avaliação dos Especialistas	85
4.3.6	Discussão dos Resultados Montagem	94
4.3.6.1	Os impactos da modularidade do produto na montagem do sistema estrutural em timberframe	94
4.3.6.2	O impacto da escala dos módulos da estrutura no processo de montagem	95
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS ESTUDOS	97
	REFERÊNCIAS.....	100

1. INTRODUÇÃO

1.1 QUESTÃO DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA

Em 2005, realizou-se o projeto mutante em um workshop na Universidade Estadual de Londrina, o projeto consistia em um sistema estrutural em madeira com uma proposição modular, no qual se utilizou chapas retangulares de Oriented Stranded Board (OSB) formando quadros retangulares (Figura 1) compondo o sistema estrutural com apenas um único módulo, buscando a sua máxima simplificação (MOURA, BARNABÉ e DIAS, 2004). Entretanto, na época de realização do experimento, não houve um estudo formal e teórico sobre as possibilidades e as implicações deste sistema estrutural. Devido a isso, apesar de ser promissor, o projeto não alcançou o seu máximo potencial. Este trabalho visa revisitar o projeto mutante, propondo seu aprimoramento com base em estudos bibliográficos e estudar as implicações de suas propostas na racionalidade de fabricação e montagem do sistema estrutural timberframe.

Figura 1



Fonte: Moura, Barnabé e Silva, 2004.

No que diz respeito aos sistemas estruturais em madeira, a construção civil está migrando para uma era de maior industrialização e maior integração com a indústria, deixando de lado os sistemas de produção mais artesanais (De ARAÚJO *et al.* 2020). Devido à tendência à industrialização no setor da construção civil, é importante estudar-se estratégias de produção como a coordenação modular, a

modularidade do produto (PSM), o design para manufatura e montagem (DfMA), entre outras. No entanto, ao se adaptar uma estratégia, pode-se trazer implicações para a cadeia produtiva, como: na fabricação, na montagem no canteiro e no transporte. Por isso, este trabalho vai avançar sobre o projeto mutante, simplificando a estrutura, racionalizando componentes, com rebatimento sobre o processo, como na montagem e fabricação.

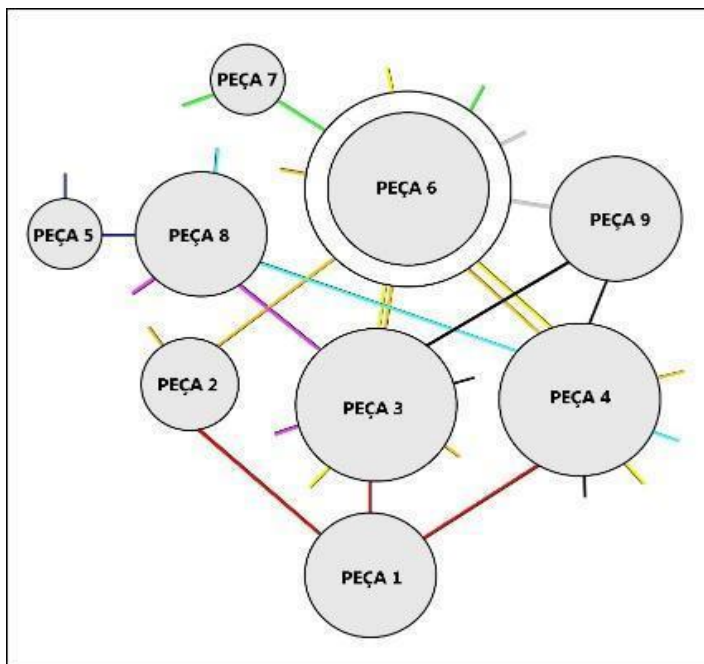
Shamsuzzoha (2009) afirma que a modularidade do produto (PSM) é uma estratégia para facilitar a montagem e a fabricação na construção civil. Segundo Salvador (2007), as principais características da modularidade do produto (PSM) são: a separabilidade dos seus componentes; e a combinabilidade destes elementos em diferentes configurações. Possuir separabilidade significa que um produto pode ser fabricado por meio de módulos separados e, posteriormente, montado em uma configuração final. Além disso, entende-se a separabilidade como forma de desmontar o produto de forma não destrutiva. A combinabilidade significa que esses módulos podem formar diferentes variantes de produtos pela troca de um ou mais componentes por outros que ainda se encaixam no padrão modular (SALVADOR, 2007).

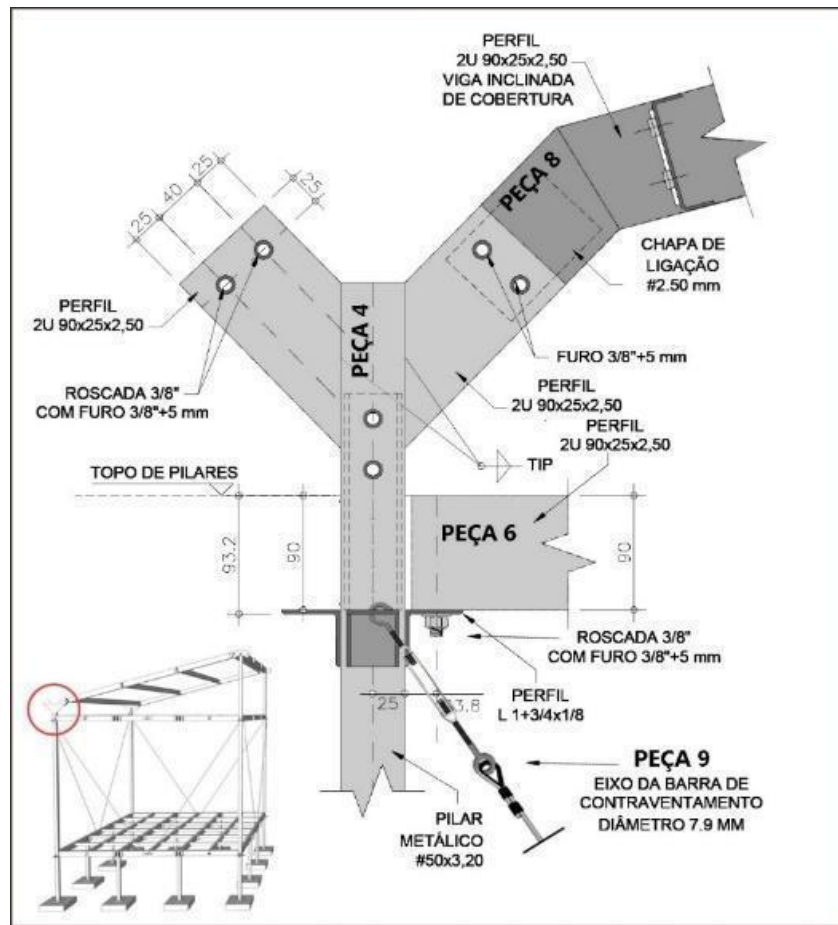
Nos últimos anos, fez-se estudos para adaptar o PSM à construção civil. Todavia, surgem algumas dificuldades. Pode-se observar essas dificuldades por uma visão tridimensional da modularidade. Inicialmente proposta por Voordijk *et al.* (2006), a divisão da modularidade em três dimensões adapta a proposta de Fine (1998), pioneiro nesta estratégia, de dividir a engenharia concorrente em três dimensões, argumentando que a modularidade também deve ser vista em 3 perspectivas: produto, processo e cadeia de suprimentos. Logo, cada uma dessas dimensões possui suas particularidades. Analisando por essa perspectiva, Rocha *et al.* (2015) argumenta que a indústria da construção civil se diferencia das outras nas seguintes questões: quanto à produção, parte da produção deve ser feita *in loco*; quanto à cadeia de suprimentos, ela é temporária, termina com a obra; e quanto ao produto, cada edifício é um produto singular.

Visto por uma perspectiva tridimensional, focar-se-á no processo de produção, entretanto Gosling *et al.* (2016) ressalta que as 3 partes estão interligadas. Uma decisão tomada em uma dessas 3 partes afetará, diretamente, a outra. Este trabalho segue uma linha de pesquisa iniciada pelo trabalho de Pasello. (2020), em que o autor

analisa, a partir da perspectiva tridimensional, o processo de montagem, transporte e fabricação de uma edificação habitacional modular em uma área remota no Pantanal. Segundo Pasello. (2020), um dos fatores que influenciaram a estratégia modular do projeto foi o transporte da sua estrutura, pois o local de construção era de difícil acesso - o local deveria ser acessado através de um barco. Era necessário, então, uma habitação que pudesse ser, facilmente, transportada, e montada de forma rápida na obra. As dificuldades de transporte influenciaram a escolha da estratégia modular (PASELLO 2020). Foi necessário dividir o projeto em diversas partes para facilitar o transporte. No sistema, foram utilizadas 8 principais peças que se relacionavam, entre si, na figura 2 pode-se ver o mapa de Ligações das peças do Sistema, a figura 3 demonstra o esquema de montagem das peças do módulo analisado por Pasello.

Figura 2 e Figura 3





Fonte: Pasello, 2020.

Devido ao complexo sistema modular analisado pelo autor houve impactos no processo de fabricação, montagem e transporte. Quanto à fabricação, foi necessária a criação de gabaritos para algumas peças, que foram posteriormente descartados do projeto. Esse é um dos problemas adereçados por Rocha *et al.* (2015): A cadeia de suprimentos temporária. Além disso, devido à complexidade, o tempo de produção das peças não foi constante, houve maior dificuldade no início do processo sendo observado aceleração à medida que o projeto evoluía (Pasello. 2020).

Quanto à montagem foram necessário trabalhadores especializados, havendo dificuldades no início, pois as peças não estavam enumeradas e era necessário descobrir onde cada peça seria encaixada. Devido à complexidade do sistema, os trabalhadores defenderam ser necessário haver um treinamento prévio. O sistema precisou ser montado e desmontado diversas vezes, devido à falta de experiência e a montagem incorreta das peças. Além disso, a falta de identificação das peças causou

confusão e retrabalho no canteiro, descarregaram-se peças em locais incorretos o que gerou perda de tempo e gastos com transporte.

O estudo de Pasello. (2020), mostra que a modularidade impacta no transporte, fabricação e montagem de um produto, entretanto ainda há dificuldades a serem superadas. Cada módulo é singular e possui suas particularidades, estes aspectos dependem de diversos fatores, como: a escala dos módulos (GOSLING *et al.*, 2016), o número de peças (GBADAMOSI *et al.*, 2019; KIM *et al.*, 2016; CHEN; LU, 2018; BANKS *et al.*, 2018; SAFAA *et al.*, 2018), a região em que os módulos serão implantados, entre outros. Por isso, é necessário estudar-se mais a fundo esse assunto. Este trabalho visa analisar as implicações de montagem e fabricação de um sistema modular construído em timberframe no Brasil a partir dos resultados trazidos por Pasello, propondo novas estratégias para incrementar a racionalidade da fabricação e montagem.

Uma das estratégias citadas por autores do design para manufatura e montagem (DFMA) é a redução do número de peças (GBADAMOSI *et al.* 2019; KIM *et al.* 2016; CHEN; LU, 2018; BANKS *et al.* 2018; SAFAA *et al.* 2018). Pressupõe-se que essa estratégia, assim como utilizada no projeto mutante pode facilitar a racionalidade de um sistema modular timberframe, buscando a simplificação, conseqüentemente simplificando o processo de fabricação e montagem, por haver um número reduzido de peças, com impacto sobre logística de transporte. Este trabalho visa, pois, estudar o problema de como incrementar a racionalidade sistema estrutural timberframe no Brasil.

A questão de pesquisa ou GAP que este trabalho visa preencher é: a redução do número de peças pode impactar a racionalidade de montagem e fabricação do sistema estrutural timberframe?

1.2 PRESSUPOSTO

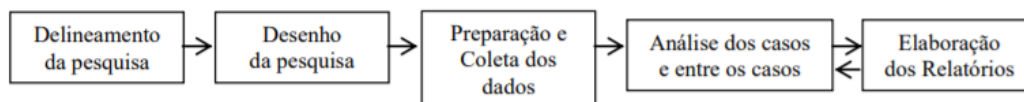
Diversas estratégias da indústria de produção em massa são utilizadas para aumentar a racionalidade do processo produtivo. A partir de uma revisão da literatura, pressupõe-se que a redução do número de peças e simplificação de um módulo construtivo, pode-se aumentar a racionalidade do processo de montagem e fabricação.

1.3 OBJETIVO

Este trabalho possui o objetivo principal de: desenvolvimento e construção de um sistema estrutural timberframe, visando alcançar maior racionalidade na montagem e fabricação.

O método a ser utilizado é o estudo de caso. Segundo Bransk *et al.* (2011), o estudo de caso é um método de pesquisa que emprega dados qualitativos, a fim de explorar, descrever ou explicar fenômenos. Na visão de Bransk *et al.* (2011), o estudo de caso envolve 5 etapas (figura 4):

Figura 4



Fonte: Bransk *et al.* (2011).

O delineamento da pesquisa consiste na definição do tema, como a definição do problema e questão de pesquisa. O desenho da pesquisa consiste na exploração por meio da revisão bibliográfica (que será feita no item 2.0) e na formação de proposições, pressupostos ou hipóteses – tratadas no item 1.2. A formação de proposições é importante, pois ajuda o pesquisador a delimitar o escopo da pesquisa (BRANSK *et al.*, 2011).

A etapa de preparação consiste na realização do estudo nos casos selecionados. Neste trabalho, o autor fará simulações em software para analisar diferentes possibilidades do sistema construtivo e construirá um protótipo em tamanho real de um projeto modular em timberframe. Este projeto terá em vista a maior simplificação dos módulos, utilizando-se da coordenação modular, ou seja, com peças/componentes já utilizadas na indústria, evitando, assim, problemas de cadeia de suprimentos temporárias, ajustes na montagem e desperdícios. O projeto terá como diretriz fundamental, minimizar o número de partes ou módulos possíveis

A análise dos casos foi feita por um grupo focal em uma banca de especialistas na área, que analisaram o aumento da racionalidade do sistema, avaliando a montagem e a fabricação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Organizou-se a revisão de literatura de forma a discutir os assuntos contemplados neste trabalho abrangendo: conceituação de modularidade e módulo (2.1), estratégias para a obtenção da modularidade do produto (2.2), estratégias obstáculos para a implementação da modularidade na construção civil (2.3), sistemas construtivos em madeira no Brasil (2.4), Processo de montagem e transporte na construção civil (2.5).

Primeiramente, no item 2.1, o autor fez uma análise do conceito de modularidade. A análise do conceito é fundamental, pois, existem muitas incógnitas quando se fala deste assunto. Além do mais, é essencial o entendimento do que este trabalho entende por modularidade do produto e módulo antes que se desenvolvam o tema.

Na segunda parte da revisão de literatura (item 2.2), contemplam-se estratégias de aplicação da modularidade do produto. O estudo das estratégias é imprescindível para a escolha da estratégia que será utilizada na construção do protótipo, e para o entendimento das dificuldades de cada uma delas.

O item 2.3 trata das dificuldades da implementação da modularidade na construção civil. Tratando das particularidades que este setor apresenta e como o autor vem lidando com elas. Essas particularidades são essenciais para qualquer proposição na área da construção civil, que difere de outros setores da indústria de produção em massa.

O item 2.4 analisa a produção de sistemas construtivos em madeira no Brasil, como a madeira vem sendo utilizada e sua perspectiva para o futuro. É necessário entender como a madeira vem sendo utilizada para a proposição de um protótipo, seu módulo e escala.

O item 2.5 apresenta os fatores que podem influenciar o transporte e a montagem dos módulos.

2.1 CONCEITUAÇÃO: MODULARIDADE DO PRODUTO E MÓDULO

A modularidade do produto possui três incógnitas. A primeira incógnita refere-se às diversas definições de modularidade, cada setor industrial? possui um conceito diferente de modularidade. A segunda incógnita se refere a própria definição de módulo, que se diferencia muito entre os diversos setores em que essa estratégia é aplicada. A terceira incógnita é definir do que se trata: um único conceito ou de diversos conceitos inter-relacionados. (SALVADOR, 2007). O entendimento dessas questões é fundamental para melhor compreensão da modularidade, que não é um conceito simples ou de fácil assimilação.

Essas incógnitas surgiram no fim dos anos 90, e no início dos anos 2.000, dois principais autores se debruçaram sobre estas incógnitas: Salvador (2007) e Gershenson *et al.* (2003). Escolheram-se estes autores, pois, estes apresentam uma revisão de literatura sobre as definições de modularidade do produto. Salvador (2007) e Gershenson *et al.* (2003) buscam relacionar as diferentes visões sobre módulo e modularidade do produto relacionando as ideias dos principais cientistas na área. Salvador (2007) o faz a partir da criação de um construto, pois, diferentemente de conceitos, construtos podem ser mensurados e não são entidades isoladas, eles se relacionam com outros conceitos. Logo, Salvador (2007) relaciona a modularidade do produto com a modularidade em outros campos. Enquanto Gershenson *et al.* (2003) tenta definir a modularidade do produto a partir das descrições de módulo que se encontram na literatura.

O termo “modularidade” é utilizado em diferentes áreas com diferentes significados. Sako e Murray (2000) distinguem três áreas da modularidade: modularidade na produção, modularidade do uso e modularidade no design. Dessa forma, a modularidade do produto é um conceito distinto desses. Apesar do uso deste termo por diversos autores, não há um consenso sobre o seu significado. Segundo Gershenson *et al.* (2003), o único consenso sobre a modularidade do produto é que: um produto modular é formado por blocos ou módulos, e que quanto maior o número de elementos internos que são módulos mais modular este produto é. Entramos, então, no segundo conceito: o que é o módulo?

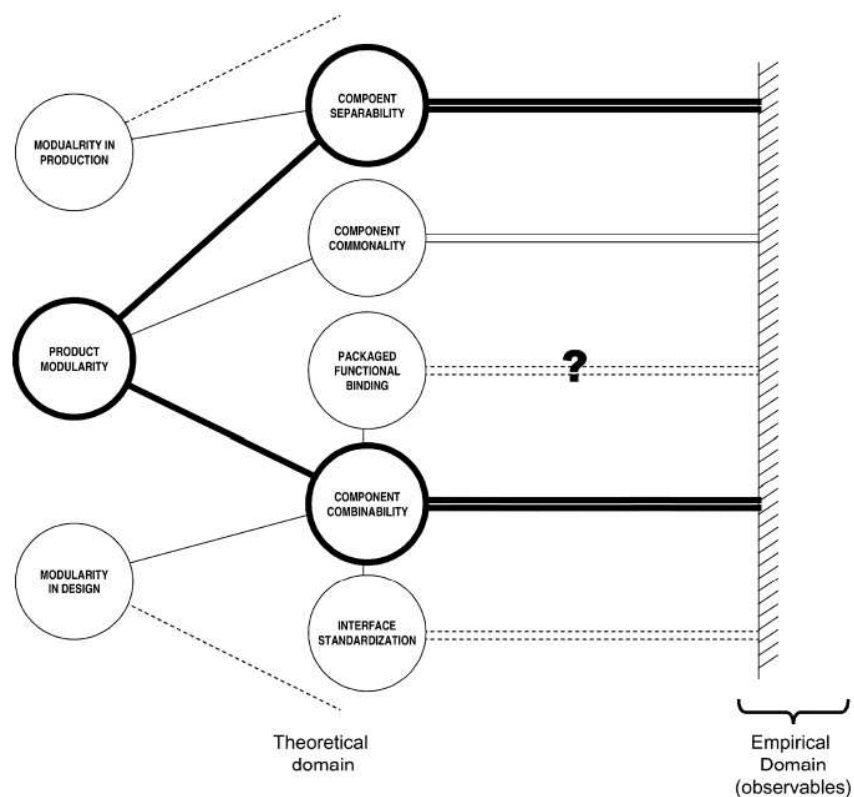
Em seu artigo Gershenson *et. al* (2003), se dedica a uma revisão de literatura sobre o significado do módulo. O autor argumenta que poucas definições chegaram aos benefícios completos que um módulo pode obter. O autor busca, então, uma definição para o módulo que contemple a máxima eficiência do módulo. Para que o módulo adquira sua máxima eficiência ele deve ter: similaridades entre os componentes externos ao módulo relacionados ao seu ciclo de vida, garantindo a substituição dos componentes; independência em relação aos elementos externos ao módulo, pois esta é a intensão do design modular; independência dos elementos internos excluída, pois isso apenas aumenta a complexidade do módulo. (GERSHENSON *et al.* 2003)

Salvador (2007) possui uma visão mais funcional. O autor argumenta que o módulo precisa ser separável, ou seja, que ele possa ser desmontável de forma não destrutiva e que possua componentes ou módulos que possam ser fabricados separadamente e montados em um produto. Além disso, o autor defende que o módulo deve ser combinável em novas configurações de um produto. De certa forma, as visões de ambos os autores se complementam: para que um módulo seja separável, é necessário que seja independente do sistema interno; as similaridades com componentes externos permitem que o módulo seja combinável em novas configurações do produto. Ambos os autores parecem ter uma visão similar do módulo, entretanto Salvador (2007) foca mais na funcionalidade e Gershenson *et al.* (2003) em características físicas que garantem essa funcionalidade.

Salvador (op.cit.) utiliza construtos — emaranhado de conceitos combinados para formar uma imagem ou ideia — para definir a modularidade do produto. O autor argumenta que a modularidade do produto não é um conceito, mas um emaranhado de diversos conceitos que se relacionam um com os outros, mostrando que modularidade do produto está relacionada com a modularidade em outras áreas, já que a modularidade do produto possuiria conceitos também utilizados nessas áreas, sendo eles a combinabilidade e a separabilidade (figura 5). Para Salvador (2007), de uma forma geral, a modularidade do produto pode ser definida através da relação com estes dois conceitos: “No domínio tangível, ‘artefatos montáveis’ um sistema do produto é modular na extensão em que seus componentes separáveis, ou módulos, são combináveis.” (SALVADOR, 2007, p. 229, tradução nossa).

A separabilidade significa que uma variante do produto pode ser criada através da construção prévia de módulos e depois os unindo em uma configuração final. Também devemos entender a separabilidade como forma de desmontar um produto de forma não destrutiva. A combinabilidade significa que estes módulos podem ser configurados para se obter diferentes variações do produto. A figura 5 evidencia o construto relacionando a modularidade do produto com a modularidade na produção e a modularidade no design. Isso mostra que os conceitos de modularidade estão inter-relacionados não sendo apenas um conceito independente

Figura 5 -



Fonte: Salvador (2007).

Conclui-se que não existe apenas um conceito de modularidade, mas diversos que variam conforme a área em que está sendo aplicado, mas também possuem interrelações. Neste trabalho, será utilizado o conceito de modularidade do produto. Apesar de Gershenson *et al.* (2003) dar uma definição para modularidade do produto ela é genérica, sendo preferível a definição de produto modular de Salvador (2007). Da mesma forma, quanto ao conceito do módulo será utilizado a definição de

Salvador. Vale ressaltar que ambas não se excluem, elas se complementam. Portanto, utilizar-se-ão as características citadas por Gershenson *et al.* (2003) de modo a aumentar a eficiência e se conceber um produto com as características definidas por Salvador (2007).

2.2 MODULARIDADE: ESTRATÉGIAS

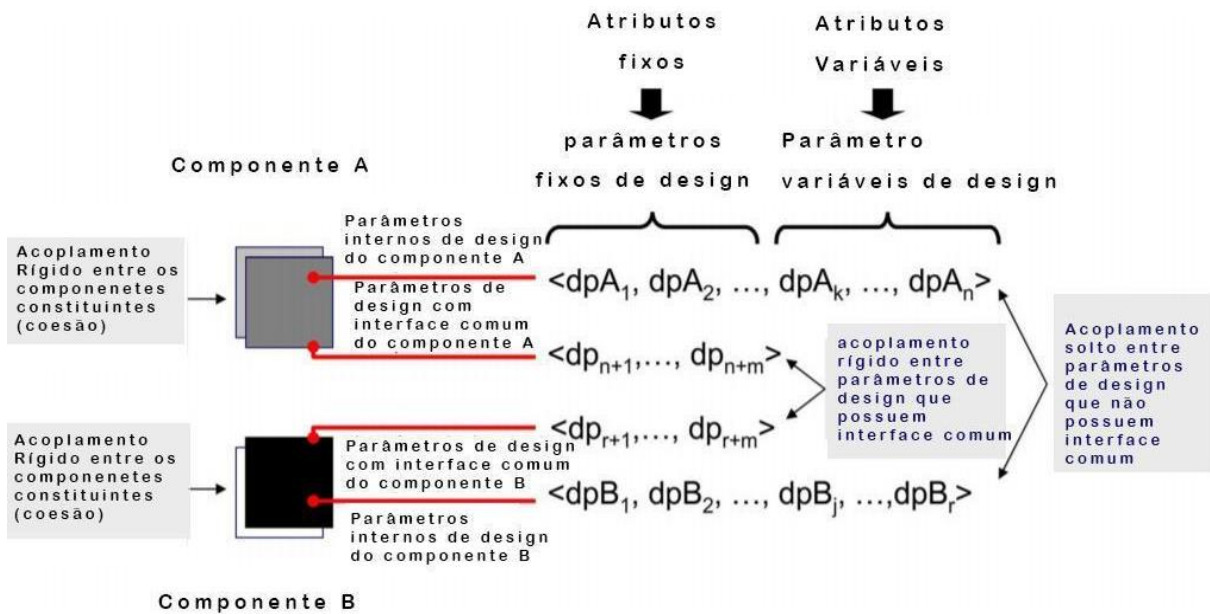
Este item foca no produto e métodos para obtenção de sua modularidade. No item 2.1, a modularidade do produto apresenta a ideia de elementos separáveis (módulos) que podem ser combinados em diferentes configurações. Entretanto, estas ideias podem ser obtidas através de diversas maneiras. Salvador (2007) relaciona na sua revisão com algumas técnicas utilizadas. Serão Abordadas duas delas: a ideia que relaciona modularidade à arquitetura modular e a que a relaciona com o acoplamento rígido e flexível (*tight coupling* e *loose coupling*, tradução do autor).

A maioria das estratégias utilizadas na indústria da construção civil relacionam-se a estas duas visões. É importante ressaltar que, apesar de alguns autores serem mais influenciados por uma ou outra destas visões, elas não são estratégias opostas, ambas possuem diferentes perspectivas. Neste trabalho, apesar de nos inclinarmos para a perspectiva do acoplamento rígido e flexível, também utilizaremos referências da arquitetura modular.

2.2.1 Acoplamento rígido e flexível

Segundo Salvador (2007), a estratégia dos acoplamentos rígidos e flexíveis (figura 6) pode, em algumas ocasiões, levar à modularidade do produto. Baldwin e Clark (2000) e Salvador (2007) auxiliam na discussão desses conceitos. Fez-se uma relação desses conceitos com o trabalho de Gosling *et al.* (2016). Assim como este trabalho, Baldwin e Clark (2000) veem a modularidade como uma forma de partir um sistema complexo em subcomponentes ou módulos. Segundo Salvador (2007), nesta visão o módulo é uma parte do sistema com um certo grau de complexidade. Essa estratégia é exemplificada por Salvador (2007).

Figura 6



Fonte: Salvador, 2007. Modificada pelo autor.

Na figura 6 há dois componentes: A e B. Imaginando que A seja uma janela e B, seja uma parede. Pode-se dividir os parâmetros de design de ambos em: Parâmetros que possuem interface comum ($dp_{n+1}; dp_{r+1}$), como, por exemplo, as dimensões da parede e da janela devem ser compatíveis (interface geométrica); e os demais parâmetros internos que não possuem interface comum com o outro componente ($dp_{A_1}; dp_{B_1}$). Para obter-se a modularidade do produto, os parâmetros de interface comum necessitam de um acoplamento rígido ($dp_{n+1}; dp_{r+1}$), ou seja, a interface geométrica (as medidas) e de fluxo (cargas estruturais) devem ser compatíveis para que ambas funcionem em conjunto. Desta forma, ambos os componentes poderão interagir entre si. Os parâmetros de design que não possuem interface comum podem ter um acoplamento solto, por exemplo: a cor da janela, o tipo de janela (basculante, de correr, pivotante...). Ou seja, os parâmetros soltos podem ser alterados, desta forma pode-se, por exemplo, fazer mudanças nos parâmetros sem interface comum do componente A (janela) formando um componente A1, A2, A3.... Desta forma, teremos um componente diferente (A1, A2, A3...) com os mesmos parâmetros de interface comum do componente A, podendo interagir com o componente B (parede) sem este ser alterado. (SALVADOR, 2007)

Um exemplo concreto é o Liina Transional Shelter (Figura 7). Segundo Hudert e Pfeifer (2019), trata-se de um abrigo temporário construído por alunos de pós-graduação do Aalto Wood Program. Liina é o nome dado as correias utilizadas para fixação de contêineres em Finlandês. O abrigo é composto de diversos módulos pentagonais em madeira que são encaixados consecutivamente através das correias que impedem a abertura do pentágono mantendo a integridade da estrutura entre cada pentágono. O abrigo foi feito para poder ser facilmente desmontável — por isso a fixação se dá por meio de correias. Outro fator importante que influenciou no projeto foi o processo de transporte. O abrigo é desmontável de tal forma que todas as suas partes caibam em um contêiner.

Figura 7



Fonte: Archdaily, 2011.

No caso deste abrigo, cada pentágono corresponde a um módulo, cada um destes módulos pode ser dividido em 5 submódulos que formam cada um dos pentágonos. Esses módulos são encaixados para formar a estrutura geral. Percebe-se que cada módulo possui parâmetros de interface comum com os outros (que devem ter um acoplamento rígido) e parâmetros sem interface comum (que podem ter um acoplamento solto). Por exemplo, alguns dos parâmetros de interface comum é o formato pentagonal e as suas dimensões. Qualquer mudança nesses dois parâmetros de um dos módulos desconfiguraria todo o sistema – e, como se viu anteriormente, a modularidade do produto se dá quando se pode modificar algum parâmetro em um

módulo, que continua funcionando como um todo sem alteração dos demais componentes - portanto esses parâmetros necessitam acoplamento rígido.

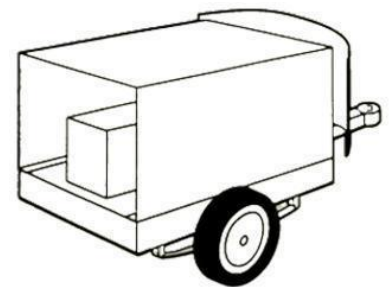
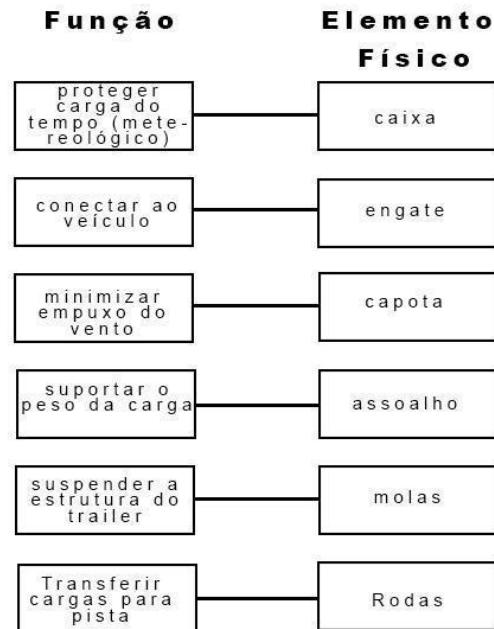
Há parâmetros de interface comum, como, por exemplo as aberturas. Aberturas como janelas podem ser feitas em um módulo, sem alterar os parâmetros de interface comum, desta forma haverá uma nova configuração de edifício alterando apenas um componente, sem afetar os demais.

2.2.2 Arquitetura Modular do Produto

Para Voordijk *et al.* (2006), um produto é modular, na construção civil, quando sua arquitetura é modular, desse modo, a arquitetura de um produto pode ser mais ou menos modular. Ulrich (1992) descreve em seu trabalho o que seria uma arquitetura modular e a classifica. O conceito de Ulrich (1992) é amplamente utilizado e aceito até hoje. Diversos autores como Rocha *et al.* (2015), Salvador (2007), Gosling *et al.* (2016) citam seu trabalho ao falar da arquitetura modular.

Uma arquitetura completamente modular possui um mapeamento um a um, de módulo e função (figura 8). Em outras palavras, cada módulo desempenha uma função independente, enquanto em uma arquitetura integral cada parte desempenha várias funções. Os mapeamentos podem ser ainda: múltiplos-para-um e um-para-múltiplo (ULRICH, 1992). De acordo com Ulrich (1992), ao se falar da arquitetura de um produto, além do mapeamento das funções com os módulos, também se refere às interfaces entre os módulos. As interfaces dos componentes podem ser padronizadas ou não (ULRICH, 1992). Os tipos de interface dependem da interação. Eppinger e Salminen (2001) propõem diversas categorias para essas interfaces, sendo elas: interações espaciais; interações energéticas; interações de informação; interações de Materiais.

Figura 8



Fonte: Ulrich, 1992. Modificado pelo autor.

A ideia da modularidade do produto como padronização de interfaces e o mapeamento de funções tem sido amplamente utilizada. As interfaces mais importantes na construção civil se relacionam com a sua geometria (ROCHA *et al.* 2015). O processo de design deve ser levado em conta ao se criar componentes modulares, principalmente quanto às suas interfaces geométricas que devem ser compatíveis. Existem também outros parâmetros que devem ser observados na construção civil, são eles: parâmetros de fluxo (cargas estruturais); parâmetros de fluido (tubulação) e geométrico (coordenação modular entre as peças) (ROCHA *et al.* 2015).

2.2.3 Conclusão

Conclui-se que em termos estratégias de aplicação da modularidade na construção civil existem duas principais influências: A da arquitetura modular que vê o produto na totalidade; E a de acoplamentos soltos e rígidos que procura a organização do todo em partes menores. Entretanto, é válido ressaltar que Rocha *et al.* (2015) ao se utilizar da arquitetura modular se refere a sua aplicação no design do edifício. Devido a isso, ela utiliza o mapeamento de funções para mapear espaços

cheios e vazios. Outros autores como Gosling *et al.* (2016), e Kudsk *et al.* (2013a) focam em componentes físicos e em suas relações. Como este trabalho foca em componentes físicos se utilizará a linha e a estratégia majoritariamente do acoplamento rígido e flexível que prevê a divisão do produto em diversas partes menores. Será utilizada a divisão hierárquica criada por Schoenwitz *et al.* (2012) e suas implicações no processo e, na cadeia de suprimentos citadas por Gosling *et al.* (2016), serão utilizadas para embasar as escolhas projetuais. No entanto, a arquitetura modular tem um estudo mais aprofundado das interfaces que podemos utilizar neste trabalho.

Apesar de duas linhas diferentes, ambas linhas convergem quando se referem a interfaces. A estratégia da arquitetura modular contribui neste trabalho principalmente quando se fala da identificação das principais interfaces a serem analisadas ao se tratar da modularidade do produto. De fato, as interfaces podem ser um problema em termos de componentes estruturais. Além das combinações desses componentes necessitarem de uma interface geométrica, é necessário que as interfaces de interações energéticas de cargas estruturais sejam compatíveis. Essas duas linhas mostram por onde se deve iniciar a discussão de modularidade na construção civil e os problemas que possivelmente se encontrarão.

2.3 Modularidade na construção civil: Dificuldades e estratégias

Neste item, apresentam-se as dificuldades encontradas ao se adaptar a modularidade na construção civil, as razões pelas quais o setor está atrasado em relação aos outros e as estratégias utilizadas para lidar com estas dificuldades. É importante tratar deste item, na medida em que a modularidade não pode ser tratada na construção civil da mesma forma com que é tratada em outros setores.

Segundo Rocha *et al.* (2015), existem duas dificuldades para a aplicação do conceito de modularidade na indústria da construção. A primeira se refere a conceituação de modularidade do produto abordado anteriormente (item 2.1), a segunda se refere às diferenças do setor da construção para outros setores. Essas diferenças foram abordadas de duas diferentes perspectivas: Perspectiva tridimensional e abordagem *top-down* e *bottom up*.

A perspectiva tridimensional foi adaptada para a área da construção civil primeiramente através de Voordijk *et al.* (2006). Nela, os autores defendem a adaptação da ideia de Fine (1998), na qual o autor propõe a divisão da engenharia concorrente em três dimensões. Desse modo, Voordijk *et al.* (2006) defende que a modularidade na construção civil deve ser considerada em 3 dimensões: Modularidade no processo, modularidade no produto e modularidade na cadeia de suprimentos (VOORDIJK *et al.* 2006). A modularidade do processo se refere a produção e a manufatura utilizadas para a construção de uma obra. A modularidade na cadeia de suprimentos se refere se as atividades serão executadas por uma única organização (*tight supply chain*) ou por várias (*loose supply chain*). (VOORDIJK *et al.* 2006)

Rocha *et al.* (2015) se aprofunda nessa ideia e destaca as diferenças da construção civil dos outros setores nas três dimensões. Quanto à perspectiva do produto: a construção civil se diferencia pela sua relação com o vazio enquanto em outras áreas o foco é apenas nos componentes (como em um computador, por exemplo: mouse, teclado, monitor...). Na construção civil, o que mais importa é o vazio que esses componentes deixam. Quanto ao processo: diferentemente de outros setores, o processo na construção civil necessita de grande parte feita in loco. Quanto à cadeia de suprimentos: Esta é limitada ao tempo da obra; após o seu término a cadeia suprimentos termina (ROCHA *et al.* 2015)

Ao adaptar a modularidade a construção civil é importante uma visão tridimensional. Gosling *et al.* (2016), apesar do seu trabalho focar no produto, ao hierarquizar os setores da modularidade o autor faz uma análise tridimensional dos impactos na produção e na cadeia de suprimentos. Por exemplo, o autor afirma que módulos no nível do edifício ou do elemento possuem um processo de fabricação e transporte complexo, diferente dos módulos no nível do componente e do subcomponente. Esses são fatores que afetam a escolha da estratégia de modularização dependendo dos recursos disponíveis. Neste trabalho, escolheu-se o nível do componente pois este possui facilidade no transporte, fabricação, integração ao sítio e manuseio (GOSLING *et al.* 2016).

Uma outra visão das dificuldades encontradas se dá pelas estratégias *top-down* e *bottom-up*. Essa abordagem parte da visão de que devido a razões econômicas ou

políticas, poucas companhias conseguem implementar a modularidade na construção por inteiro (KUDSK *et al.* 2013b). A abordagem *bottom-up* (de baixo para cima), minimiza a escala dos módulos e conseqüentemente os riscos do investimento. Esta consiste em aplicar a modularidade do produto para a customização em massa - estratégia utilizada pela indústria da manufatura para fornecer grandes produtos customizados com o preço e velocidade semelhantes a produtos padronizados - em uma pequena parte do edifício. Kudsk *et al.* (2013a) também estuda a abordagem *top-down* (de cima para baixo). Nesta, todo o sistema é dividido em seus principais componentes até se ter o entendimento do todo. Shaffie *et al.* (2020) compara as análises *top-down* e *bottom-up* e conclui que ambas possuem pontos positivos e negativos e sua aplicação dependa da ocasião. Este trabalho se baseia numa estratégia *top-down* pois trabalha com elementos em maior escala.

Sobretudo, as abordagens dos autores apresentam perspectivas diferentes apesar de terem um mesmo objetivo. A abordagem *top-down* e *bottom-up* foca na escala de implantação do produto, enquanto a dos autores, com influência da abordagem tridimensional, focam nas etapas do processo de construção e como a modularidade se manifesta nessas diferentes etapas. É possível dizer que a abordagem de Gosling *et al.* (2016) com influência de Voordijk *et al.* (2006) possui maior ênfase na linha de produção e na cadeia de suprimentos, relatando as implicações que a modularidade terá em cada fase do processo incluindo transporte, fabricação e montagem. Kudsk *et al.* (2013a) apresenta uma perspectiva mais voltada para o produto em suas diferentes escalas. As ideias não são excludentes. Essas duas visões podem ser relacionadas e trabalhadas em conjunto, não sendo opostos ou com conceitos excludentes e possuindo um mesmo objetivo: customização em massa, economia e racionalização da linha de produção.

As formas de adaptação da modularidade na construção civil servem como uma base para este trabalho. A linha da modularidade tridimensional contribui para a percepção da modularidade em diferentes dimensões e das conseqüências que teremos na sua aplicação, pensando além do produto: produção e a cadeia de suprimentos. Quanto à produção: as dificuldades que se encontrará ao integrar a produção na indústria e a montagem *in loco*, pensar na mão de obra que executará o serviço, como será realizado o transporte... Em relação à cadeia de suprimentos: é necessário prever uma cadeia que não termine ao final da obra e racionalizar os

produtos da indústria com o que será utilizado por meio da coordenação modular. Apesar do foco do neste trabalho ser o produto, as três dimensões estão relacionadas. Isso permitirá refletir sobre as dificuldades de transporte e produção, indo além do produto. Quanto à abordagem *top-down* e *bottom-up*, apesar de voltadas para uma linha mais prática contribuem para identificar a escala aplicável a cada situação.

2.3.1 Coordenação Modular

A modularidade não deve ser confundida com a coordenação modular. Segundo Ferreira *et al.* (2008), a Coordenação Modular é um método ou uma abordagem de projeto com elementos construtivos dimensionados a partir de uma unidade de medida comum. Segundo a NBR-5706 (ABNT, 1977), coordenação modular é uma: “Técnica que permite relacionar as medidas de projeto com as medidas modulares através de um retículo espacial de referência.”. Essa unidade é geralmente conhecida como módulo. A coordenação modular não é uma técnica recente, segundo Ferreira *et al.* (2008), é utilizada desde a Antiguidade de diferentes formas.

Atualmente, a coordenação modular é uma estratégia para coordenar as dimensões dos elementos produzidos nas fábricas com os projetos arquitetônicos. Dessa maneira, há um ganho de maior racionalidade, já que os elementos do projeto já estão sendo produzidos na indústria, em uma cadeia de suprimento pré-existente. Além disso, devido a essa integração o número de ajustes necessários no produto é reduzido, reduzindo o desperdício de materiais e o tempo de montagem.

A coordenação modular deve ser prevista na etapa do projeto arquitetônico, e influenciará durante toda a obra. Por exemplo, ao definir as dimensões das vedações de um edifício deve-se considerar as medidas das peças produzidas pela indústria. Imagine-se uma divisória com um módulo $M = 20$ cm, ao se definir as dimensões serão necessários utilizar módulos compatíveis com M , por exemplo, $4M$, dessa forma compatibiliza-se as medidas do projeto com a produção industrial. A coordenação modular influencia na montagem de um edifício, evitando ajustes na obra e permitindo aumentar a racionalidade da construção.

Ao se utilizar a coordenação modular é importante definir se o sistema será aberto ou fechado. De acordo com Imperiale (2012), a “teoria dos sistemas” foi criada

pelas ciências físicas e biológicas. Nesta, um sistema fechado é aquele que se relaciona com um número finito que tende a uma condição de entropia; enquanto o sistema aberto é aquele se aproxima de processos orgânicos e não orgânicos. Porém, na arquitetura, um sistema aberto é aquele que se relaciona com um vasto número de materiais e equipamentos. O fechado é o que se relaciona com um número finito de que pode ser manipulado no sistema.

2.4 SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM MADEIRA NO BRASIL

Na Europa, em 2016, dos 170 Mm³ de madeira utilizados, 70% foram destinados à construção civil (HUBERT; PFFEIFER, 2019). Segundo De Araújo *et al.* (2016), se houvesse substituição do concreto, metais e cerâmicas pela madeira, não apenas a demanda energética seria reduzida, o meio ambiente também seria beneficiado. Além disso, segundo Carvalho (2020), a madeira é uma ótima alternativa para edifícios pré-fabricados, devido a sua baixa densidade e a facilidade de montagem.

No Brasil, pouco se utiliza a madeira na construção civil em comparação com outros países. Entretanto, a utilização da madeira como material na construção civil vem ganhando cada vez mais destaque. Segundo Hughes (2019), a madeira, entre o concreto e o aço, é o material que menos consome energia no ciclo de vida de um edifício. Apesar de ter uma energia incorporada (MJ/kg) maior que o concreto, geralmente se necessita de um grande volume de concreto em comparação com a madeira na construção de um edifício. Além disso, a madeira retém o CO², e transforma energia de baixo rendimento em energia de alto rendimento. Atualmente, existem diversas formas de se construir em madeira, é importante ao pensarmos em módulos de madeira considerarmos como a construção de madeira é feita no Brasil, isso ajuda a decidir o tipo e a escala do módulo a ser utilizado.

É imprescindível, ao se discutir o papel da madeira na construção civil, citar o sistema de produção. A madeira pode ser utilizada de acordo com sistemas mais tradicionais ou sistemas com maior nível de industrialização e pré-fabricação. De acordo com Isopp (2018), a pré-fabricação traz vantagens importantes como a qualidade superior dada pela energia incorporada pré-aperfeiçoada, por meio de controle de performance, além de reduzir o barulho e a poluição, trazendo, portanto, menor incômodo para a comunidade ao redor.

Segundo De Araújo *et al.* (2016) há 15 diferentes classificações de técnicas de construção em madeira. Entre esses sistemas estruturais, um dos mais utilizados e conhecidos no Brasil se dá ao Entramado pesado ou pilar-viga. Segundo Benson (1997), o sistema estrutural pilar-viga é uma estrutura autoportante, com elementos de madeira ligados por conectivos, sendo a base do sistema estrutural de uma edificação. O sistema pilar-viga, em relação ao seu processo construtivo, é um sistema que De Araújo (2016) considera “misto”, por possuir componentes pré-fabricados, entretanto que devem ser encaixados e montados in loco se aproximando ao sistema woodframe.

De acordo com De Araújo *et al.* (2020) há 5 diferentes Sistemas de Produção em edifícios de pequeno porte (principalmente habitacionais), que podem ser vistos no quadro 2. Percebe-se que o sistema pilar-viga está apenas atrás do volume Pré-fabricado, no mesmo nível do woodframe.

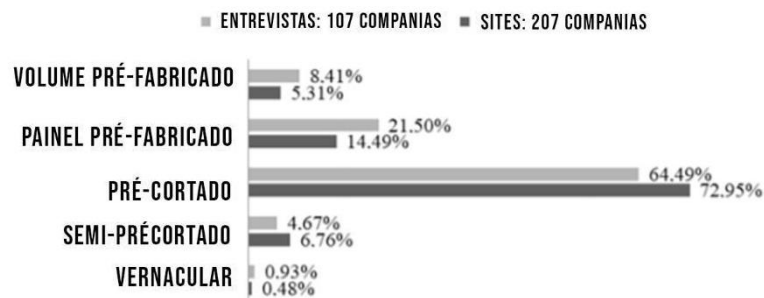
Quadro 2

Sistema de Produção	Técnica de Construção em madeira
Vernacular	Timber frame incompleto; madeira e alvenaria
Semi Pré-Cortado	Casa de troncos; tábuas com lambril
Pré-Cortado	Tábuas horizontais entre vigas; tábuas pregadas (horizontais ou verticais)
Painel Pré-fabricado	Pilar-Viga; Woodframe (balão/Plataforma/ misto)
Volume Pré-fabricado	Casa modular (woodframe/CLT); Casa Portátil

Fonte: De Araújo *et al.*, 2020.

De Araújo *et al.* (2020) afirma que o Brasil ruma a maior pré-fabricação dos sistemas em madeira, baseado nos dados recolhidos em sua pesquisa (figura 9). Os sistemas em madeiras mais tradicionais e com menor nível de pré-fabricação estão cada vez mais escassos, enquanto sistemas com maior pré-fabricação vão ganhando força gradativamente. Isso mostra a relevância de estudos em técnicas com maior grau de pré-fabricação.

Figura 9



Fonte: De Araújo et al., 2020. Tradução nossa.

É importante entender se a produção é feita *in loco* ou de forma industrializada, isso guiará na produção do melhor sistema possível. De acordo com De Araújo *et al.* (2020), a produção habitacional em madeira está disponível em 5 configurações diferentes (figura 10):

- (1) *In Loco*: Artesanal, ocorre exclusivamente no sítio da obra.
- (2) Misto na própria obra: alguns estágios são feitos de forma industrializada pelo próprio produtor e outros no sítio.
- (3) Misto com um parceiro: partes feitas por um parceiro para serem ajustadas no sítio.
- (4) Totalmente Industrializado na própria obra: as partes são industrializadas produzindo kits pré-fabricados alocados na obra.
- (5) Totalmente Industrializados por parceiros: um parceiro produz as peças que são apenas montadas na obra. (DE ARAÚJO *et al.*, 2020).

Figura 10 .



Fonte: De Araújo et al., 2020. Modificado pelo autor.

Como se pode notar, a produção de construções de madeira está migrando cada vez mais para uma configuração interligada com a indústria e reduzindo as produções mais artesanais.

Este trabalho utilizará sistema de timberframe pré-fabricado, tendo em vista que esse sistema apresenta um crescimento e tende a se expandir. Quanto ao sistema de montagem utilizaremos um sistema semelhante ao 4 (Totalmente Industrializado na própria obra) tendo em vista de que este é o sistema de produção mais utilizado atualmente.

2.5 PROCESSO DE MONTAGEM E FABRICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Este item analisa a influência do design modular no transporte e na montagem na construção civil. A modularidade ao ser utilizada na construção civil impacta a fabricação e a montagem como discutido por Pasello (2020). Nem sempre esses impactos são positivos. Visto que nem todos os módulos são iguais, o impacto do módulo na fabricação e na montagem dependerá da escala, como é ressaltado por Gosling *et al.* (2016). Este fator será analisado no item 2.5.2.

Além disso, este capítulo apresenta uma estratégia adaptada da indústria da manufatura: o design para manufatura e montagem (DFMA), e o suporte que essa estratégia pode trazer ao ser aplicada à modularidade.

2.5.2 A relação entre escala, montagem e fabricação dos módulos

De acordo com Dubois e Hulthén (2018), existem 3 principais categorias de configurações de transporte e logísticas na construção civil, são elas:

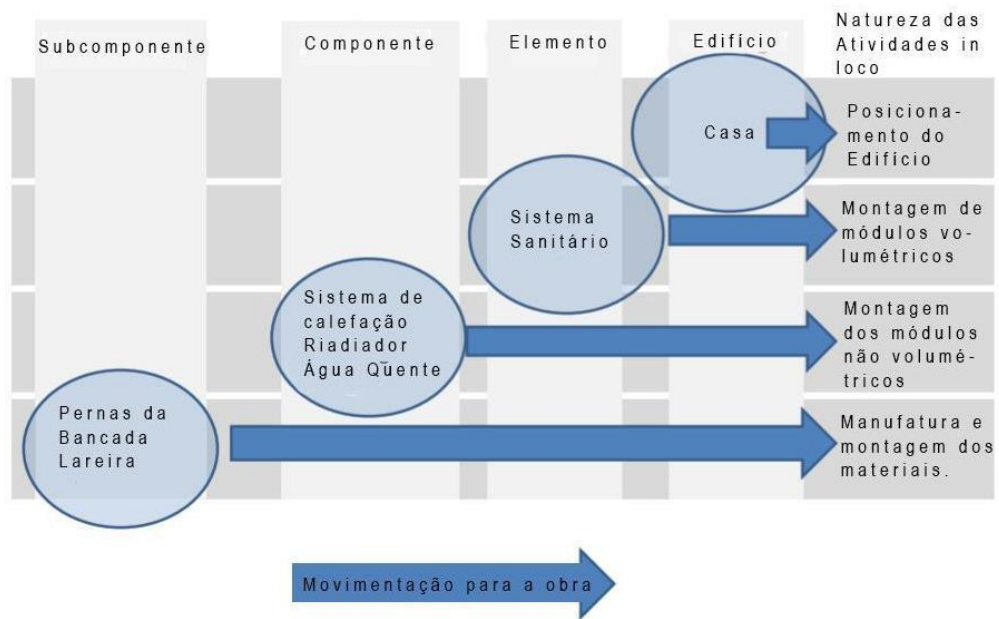
Decentralizada, nessa logística cada fornecedor é responsável pela sua própria logística, possui o mínimo de coordenação do todo;

Coordenação *in loco*, envolve uma coordenação das logísticas *in loco* com a cadeia de suprimentos;

A rede de suprimentos coordenada, envolve uma coordenação além da feita *in loco*, se estendendo para a rede de suprimentos, reduzindo ao máximo o número de manuseio e armazenamento *in loco*.

A escolha da escala do módulo impacta a logística a ser utilizada. Gosling *et al.* (2016) em seu trabalho, parte de uma perspectiva internacional e utiliza a hierarquização criada por Schoenwitz *et al.* (2012) para dividir os módulos da construção em 4 escalas: Subcomponente, componente, elemento e edifício - figura 11 (SCHOENWITZ *et al.*, 2012). Gosling *et al.* (2016) mostra que cada nível da hierarquia possui diferente relação entre o que é pré-fabricado e o que é montado *in loco*. Além disso, cada um desses itens possui uma ideia diferente do que é um módulo e como ele se organiza. Devido a sua hierarquização com a arquitetura e a relação com o sistema tridimensional essa visão será utilizada para partir o sistema deste trabalho. Ao nível de hierarquia, utilizar-se-á o módulo do subcomponente, ou seja, módulos não volumétricos, pois, segundo o autor, estes possuem maior facilidade no transporte, na fabricação, na integração ao sítio e no manuseio (GOSLING *et al.*, 2016).

Figura 11



Fonte: Gosling et al., (2016), modificado pelos autores.

Em seu estudo Gosling *et al.* (2016), promove um estudo de casos e indica que módulos menores na escala do subcomponente e do componente oferecem maior facilidade para serem manufaturados, transportados e manuseados (Quadro 3). Shamsuzzoha (2019), em seu estudo sobre a modularidade e a sua cadeia de suprimentos afirma que módulos menores e com um número de componentes limitados são mais fáceis de serem desenvolvidos e fabricados, além disso, o autor recomenda fortemente a desenvolver módulos de tamanhos menores e evitar logística e cadeias de suprimentos complexas. Isso pode ser observado no trabalho de Pasello (2020), em que o autor relata a dificuldade de transporte devido à necessidade de uma logística mais elaborada, apesar de as peças terem dimensões reduzidas.

Quadro 3

Escala	Módulos	Complexidade do processo	Módulos	Complexidade do processo
Edifício	Sem módulos para este estudo	Manufatura: Complexo	Módulo de casa de Madeira (11)	Manufatura: Complexo
		Transporte: Complexo		Transporte: Complexo
		Integração com o sítio: Complexo		Integração com o sítio: fácil
		Transporte: Fácil		Transporte: Complexo
Elemento	Sem módulos para este estudo	Manufatura: Complexo	Banheiro (21) Cápsula de Quarto (25) Cápsula de Quarto (26)	Manufatura: Complexo
		Transporte: Fácil		Transporte: Complexo
		Integração com o sítio: Complexo		Integração com o sítio: Fácil
		Transporte: Fácil		Transporte: Complexo
Componente	Piso (2) Estrutura Pré-Fabricada de Concreto (11) Telhado Pré-Fabricado (19) Parede Externa (22) Elementos do telhado (24)	Manufatura: Fácil	Piso (3,4 e 5) Sistema Elétrico (9 e 10) Luminárias (13 e 14) Janelas (15) Telhado (18) Paredes internas (23) Sistema de Fachada (28)	Manufatura: Fácil
		Transporte: Fácil		Transporte: Fácil
		Integração com o sítio: Fácil		Integração com o sítio: Fácil
		Transporte: Fácil		Transporte: Fácil
Subcomponente	Elementos do piso (1 a 8) Tijolo Tradicional (30) Viga de Carvalho (32)	Manufatura: Fácil	Elemento de Piso Suspenso (6 e 7) Pilares (16) Vigas (17) Painéis (20) Viga estrutural (29)	Manufatura: Fácil
		Transporte: Fácil		Transporte: Fácil
		Integração com o sítio: Fácil		Integração com o sítio: Fácil
		Transporte: Fácil		Transporte: Fácil

Fonte: Gosling et al., 2016.

Cada um dos módulos possui diferentes etapas no processo de montagem e transporte, por exemplo: o abrigo Kakoon (figura 12), produzido na Universidade Aalto. O abrigo possui um módulo na escala do edifício. A edificação é composta por módulos que podem ser empilhados. O módulo é feito de madeira e conta com encaixes convencionais, com exceção da ligação vertical entre os módulos, que conta com uma ligação de simples encaixe-desencaixe. Nesse caso, a logística do transporte foi a da rede de suprimentos coordenada, as peças foram produzidas e montadas na indústria: após a montagem do módulo do edifício, foi transportado para a obra. Essa configuração envolve uma complexa logística e uma dificuldade de transporte principalmente em locais de difícil acesso.

Figura 12



Fonte: Archdaily, 2016.

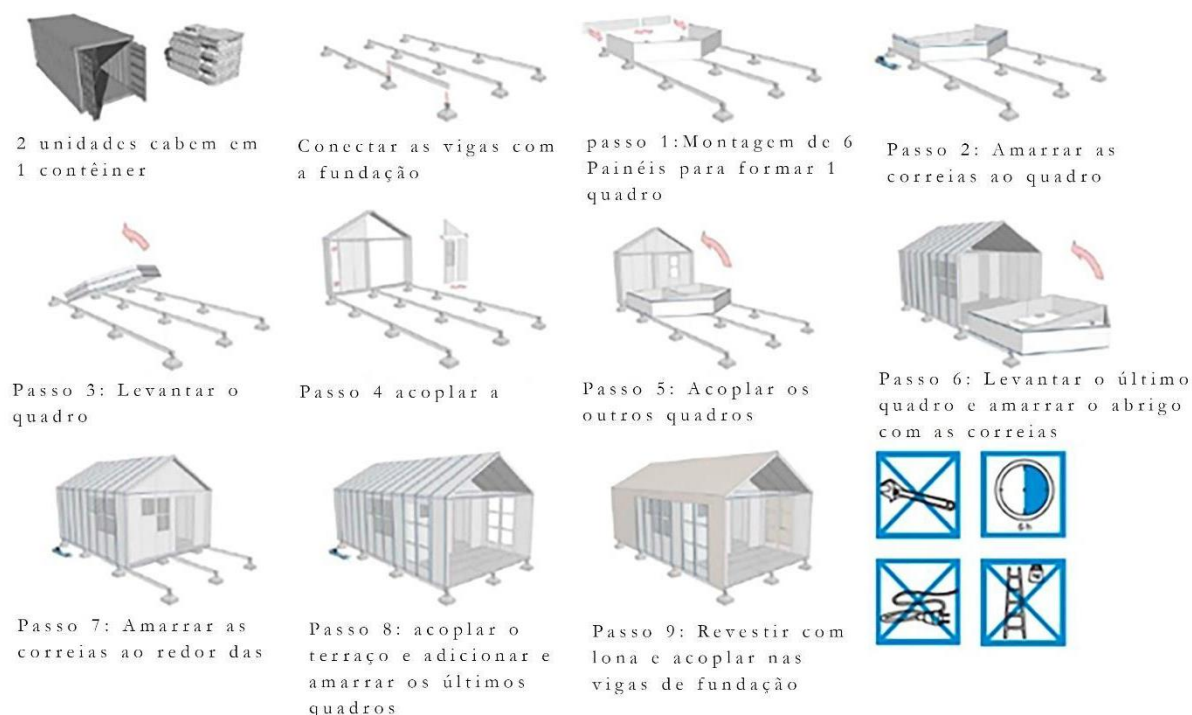
De acordo com Gosling *et al.* (2016), um módulo nessa escala possui uma alta complexidade de manufatura, transporte e manuseio, entretanto, uma fácil integração com o sítio. Deve-se levar em conta a questão geográfica de cada projeto, a mão de obra e os equipamentos disponíveis para a montagem de cada edifício. Devido a isso,

este trabalho utiliza como referência Gosling *et al.* (2016), pois, o autor analisa projetos ao redor de vários locais no mundo, inclusive no Brasil.

Ao compararmos Kakoon com o Liina Transitional Shelter, já visto anteriormente, pode-se ver que há diferentes impactos. Os módulos do Liina podem ser classificados na escala do subcomponente. Segundo Gosling *et al.* (2016), essa escala possui maior facilidade de montagem, integração ao terreno, manuseio e transporte. Na Figura 13 pode se ver que o abrigo foi pensado para ser facilmente manuseado, fabricado e montado, não é necessário o uso de ferramentas complexas para a sua montagem ou até mesmo energia elétrica, o abrigo pode ser montado em 6 horas. Além disso, o abrigo pode ser facilmente armazenado em um contêiner e ser transportado.

Figura 13

Diagrama de Montagem



Fonte: Archdaily, 2016, traduzido pelo autor.

O projeto mutante (figura 14) se situa entre a escala do componente ou do elemento, classificou-se desta maneira, pois seus módulos estruturais possuem uma escala maior que o Liina Transitional Shelter, porém menores que o abrigo Kakoon.

Segundo Gosling et al. (2016) módulos em escalas maiores como do elemento possuem maior complexidade na manufatura, manuseio e transporte.

Figura 14



Fonte: Moura Barbabé e Silva, 2004.

Relacionando o quadro de De Araújo *et al.* (2020) no item anterior com esses dados é possível notar que a quantidade de volumes pré-fabricados ou painéis pré-fabricados de madeira no Brasil é baixa em comparação com a de outros módulos menores (DE ARAÚJO *et al.* 2020). Isso pode ocorrer devido às complexidades de manuseio, fabricação e transporte relatadas por Gosling *et al.* (2016). Conclui-se então, que para facilitar a montagem e o transporte no Brasil, o ideal é trabalhar-se com módulos na escala do componente ou do subcomponente e utilizar as sugestões de Shamsuzzoha (2019) evitando a necessidade de uma logística elaborada.

2.5.1 Design para manufatura e montagem (DFMA)

O design para manufatura e montagem é uma estratégia que pode ajudar a aumentar a racionalização da montagem, essa estratégia vem sendo utilizada em outros setores da manufatura e aliada a modularidade, pode trazer benefícios ao processo. Segundo Bogue (2012), Design para a manufatura (DFM) e Design para a montagem (DFA) são estratégias próximas. Enquanto o design para a manufatura se concentra em partes individuais, o design para montagem se concentra em unir estas

partes. Por esse motivo, muitas vezes essas estratégias são desenvolvidas juntas – Design para a manufatura e montagem (DFMA)

Segundo Tan Tan *et al.* (2020), o DFMA surgiu durante a segunda guerra mundial durante a produção de armas, e começou a ganhar destaque nos anos de 1960 e 1970. De acordo com o autor, recentemente, o DMA está ganhando destaque na indústria da construção civil. Segundo Tan Tan *et al.* (2020), nos últimos anos diversos princípios foram consolidados para o uso do DFMA - como a redução do número de partes (demonstrado em autores como: KUO *et al.* 2001; EASTMAN, 2012; BOGUE, 2012), ou achar o uso mais eficiente de módulos (ASHLEY, 1995) – Apesar de fontes diferentes, eles apresentam grande similaridade: Minimização, padronização e design modular como principais diretrizes para o DFMA (TAN TAN *et al.*, 2020).

Tan Tan *et al.* (2020) em seu trabalho faz uma revisão bibliográfica das diferenças da indústria da manufatura e a indústria da construção civil nos últimos anos, e das diretrizes utilizadas, por esse motivo o trabalho do autor será referenciado como fio condutor para este capítulo. Em primeiro lugar, é importante destacar que o DFMA não foi criado para a indústria da construção civil, por isso ao ser aplicado a indústria da construção necessita sofrer adaptações. Isso se deve principalmente porque a indústria da construção sempre possui uma produção feita *in loco* e o produto final sempre possuirá um local fixo (TAN TAN *et al.* 2020). No quadro 4, vê-se as principais diferenças entre a indústria da manufatura e a indústria da construção.

Quadro 4

<i>Perspectivas</i>	<i>Indústria da manufatura</i>	<i>Indústria da Construção</i>
<i>Lugar</i>	Atividade pouco localizada	Atividade altamente localizada
<i>Energia</i>	Mecanização da fábrica	Trabalho manual <i>in loco</i>
<i>Modo</i>	Produção em massa	Design customizado
<i>Forma</i>	Atividade baseada no produto	Atividade baseada no projeto
<i>Período</i>	Ciclo curto	Ciclo longo
<i>Processo</i>	Fluxo de trabalho padronizado	Fluxo de trabalho não padronizado

Fonte: Tan Tan et al. 2020. Tradução nossa.

Este quadro define as diferenças do produto da indústria da manufatura para a indústria da construção civil, Tan Tan *et al.* (2020) destaca que apesar de haver similaridades, elas se diferem.

Tan Tan *et al.* (2020) analisa as tentativas de aplicação do DFMA na indústria da construção civil com base em 5 trabalhos recentes: Gbadamosi *et al.* (2019); Kim *et al.* (2016); Chen e Lu (2018); Banks *et al.* (2018); Safaa *et al.* (2018). Essa análise é mostrada na tabela 1, onde o autor lista as diretrizes de cada autor para aplicação do DFMA e as estratégias que os autores irão utilizar para atingir tais resultados. Legenda: ①=Bogue, 2012; ②=Stoll, 1986; ③=Emmatty and Sarmah, 2012; ④=Swift and Brown, 2013:

Tabela 1.

No.	Referência	Diretrizes	Fontes
1	Gbadamosi et al. (2019)	<ul style="list-style-type: none"> (1) Fácil Montagem (2) Fácil Manuseio (3) Velocidade de Montagem (4) Desperdício durante o design 	<ul style="list-style-type: none"> (1) Minimizar e padronizar os tipos de conectores e a quantidade (1;2;3;4) Utilizar componentes padronizados e existentes (1;2;3;4) (2) Projetar para fácil orientação e manuseio (1;2;4); Minimizar a contagem de partes (1;2;3;4) (3) Projetar com uma estratégia de montagem pré-determinada (1;4) (4) Utilizar materiais sustentáveis (3)
2	Kim et al. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> (1) Simplificação no design (2) Número de partes reduzido (3) Padronização de partes usadas comumente. (4) Fácil orientação, manuseio e encaixe das peças 	<ul style="list-style-type: none"> (1) Projetar paraa fácil fabricação (1;2;4);Projetar para fácil orientação e manuseio (1;2;4) (2) Reduzir o número de peças (1;2;3;4) (3) Reduzir e padronizar os tipos de conectores e quantidade (1;2;3;4); Utilizar materiais similares (1;4) (4) Projetar para fácil orientaçãoe manuseio(1;2;4)
3	Chen and Lu (2018)	<ul style="list-style-type: none"> (1) Reduzir o número de partes do muro cortina (2) Reduzir o número de fixadores necessários para montagem do sistema de muro cortina (3) Usar materiais com melhor custo benefício (4) Usar materiais leves (5) Reduzir o desperdício 	<ul style="list-style-type: none"> (1) Minimizar o número de peças (1;2;3;4) (2) Minimizar e padronizar a quantidade e o tipo de conectores (A;B;C;D) (3) Utilizar materiais similares (1;4) (4) Projetar para fácil orientação e manuseio (1;2;4) (5) Usar materiais sustentáveis(1;2;4)
4	Banks et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> (1) Uso de elementos pré-fabricados e módulos (2) Reduzir o número de partes únicas (3) Remover atividades -intensivas de construção no sítio. (4) Disponibilizar as atividades de pré-fabricação em um ambiente industrial controlado (5) Usar uma abordagem automatizada (6) Reduzir o desperdício (7) Melhorar a eficiência da logística e a redução do transporte dos materiais para dentro e fora do sítio (8) Reduzir o número de partes (9) Reduzir a proporção de trabalho realizada em ambiente relativamente insalubre. 	<ul style="list-style-type: none"> (1)Utilizar elementos padronizados e disponíveis no mercado (1;2;3;4) (2) Minimizar e padronizar a quantidade e o tipo de conector (1;2;3;4) (3) Reduzir o número de partes (1;2;3;4) (4) Considerar design para montagem mecanizada e automatizada (1;3;4) (5) Considerar design para montagem mecanizada e automatizada (1;3;4) (6) Considerar design para montagem mecanizada e automatizada (1;3;4) (7) Utilizar materiais sustentáveis (3) (8) Reduzir o número de peças (1;2;3;4) (9) Considerar design para montagem mecanizada e automatizada (1;3;4)
5	Safaa et al. (2019)	<ul style="list-style-type: none"> (1) Simplificar o design (2) Número de componentes (3) Padronização dos elementos ou materiais (4) Fácil Manuseio 	<ul style="list-style-type: none"> (1) Projetar para fácil fabricação (1;2;4); Projetar para fácil orientação e manuseio (2) Reduzir o número de partes (1;2;3;4) (3) Reduzir e padronizar o tipo e a quantidade de conectores (1;2;3;4); Usar materiais similares (1;4) (4) Projetar para fácil orientação e manuseio (1;2;4)

Fonte: Tan Tan et al., 2020. Traduzido pelo autor.

A análise dessa tabela indica que estes autores possuem algumas diretrizes em comum, as diretrizes encontradas em 4 ou mais destes trabalhos podem ser vistas no quadro 5. Ainda é possível perceber que as estratégias que aparecem em quase todos os 5 trabalhos são: reduzir o número de partes e minimizar e padronizar os tipos de conectores e a sua quantidade.

Quadro 5

AUTORES	Gbadamosi et al.	Kim et al.	Chen e Lu	Bansk et al.	Safaa et al.
Minimizar e Padronizar os tipos de conectores e a quantidade					
Reduzir o número de partes					

Fonte: Autor, 2021.

Essas 2 diretrizes, por serem citadas em diversos trabalhos recentes, serão as seguidas neste trabalho. A primeira estratégia, minimizar e padronizar os conectores e as suas quantidades, pode ser alcançada através da estratégia modular na medida em que a modularidade prevê uma padronização dos elementos constituídos. Segundo Gershenson *et al.* (2003), para que um módulo alcance a sua máxima eficiência ele deve possuir similaridades entre os componentes externos ao módulo relacionados ao seu ciclo de vida, garantindo a substituição dos componentes. Em outras palavras, os componentes devem ter conexões padronizadas e de fácil montagem e desmontagem.

A segunda diretriz está diretamente ligada à terceira, muitas vezes, reduzir o número de partes pode conflitar com a fácil orientação e manuseio. Quando se fala de módulo é importante lembrar que o módulo possui diversas escalas, e que a escala do módulo pode impactar diretamente a montagem e o transporte. Utilizar um módulo volumétrico pode reduzir o número de partes ao extremo, entretanto o manuseio seria extremamente dificultado. A escala do módulo deve ser escolhida de forma cautelosa, como veremos no próximo item.

2.6 Análise por categoria

A partir da revisão de literatura, fez-se uma análise de alguns projetos do sistema estrutural a partir da perspectiva do autor, analisou-se cada projeto de acordo com as seguintes diretrizes projetuais:

Modularidade da arquitetura: Viu-se anteriormente que a arquitetura de um componente pode ser mais ou menos modular dependendo do número de funções

que cada elemento exerce. Classificou-se, portanto, a estrutura em: arquitetura pouco modular, os módulos estruturais exercem duas ou mais funções, a modificação de sistemas adjacentes a estrutura, como por exemplo a vedação, não pode ser feita sem alterar o módulo; arquitetura modular, o módulo exerce apenas uma função, os sistemas adjacentes ao módulo podem ser trocados sem a alteração deste.

Integração com a cadeia de suprimentos e coordenação modular: Analisou-se o nível de integração com a cadeia de suprimentos com base no uso de peças de uma cadeia de suprimentos já existente, facilitando o processo de fabricação. Foi classificado em: baixa, as peças necessitam ser fabricadas fora de uma cadeia de suprimentos já existente; média: Algumas peças precisam ser fabricadas fora da cadeia de suprimentos; alta: o módulo é feito com peças fornecidas pelo mercado, não é necessária a criação de uma nova cadeia de suprimentos

Escala dos Módulos: Observou-se que o módulo pode possuir diferentes escalas, que impactam nos processos de fabricação, montagem e transporte. Schoenwitz et al. (2012) classifica os módulos em quatro escalas vistas anteriormente, são elas em ordem decrescente respectivamente: escala do edifício, escala do elemento, escala do componente e escala do subcomponente.

Estratégia de implementação: Vê-se que a modularidade na indústria da construção civil possui suas dificuldades de implementação, por isso existem duas principais formas de implementá-la: através da estratégia *top down*; ou através da estratégia *bottom-up*.

Além da análise das diretrizes projetuais de cada projeto, analisou-se os impactos dessas diretrizes na fabricação, na montagem e no transporte.

Liina transitional Shelter

Quanto à arquitetura do produto, o Liina Transitional Shelter (figura 15) apresenta uma arquitetura pouco modular, ou seja, cada elemento exerce mais de uma função. A estrutura do edifício também serve como vedação horizontal e vertical, impondo aos módulos mais de uma função, isso pode dificultar a coordenação modular com os componentes produzidos pelo mercado. Em termos de coordenação modular, o produto possui peças que necessitam ser fabricadas fora de uma cadeia de suprimento já existente, dificultando o processo (ROCHA et al., 2015)

Figura 15



Fonte: ArchDaily, 2011.

A escala apresentada pelos módulos desse edifício é a escala do subcomponente, os projetistas optaram por essa escala para facilitar o processo de fabricação, montagem e transporte. A escala reduzida dos módulos estruturais e a padronização e simplificação dos encaixes possibilita que o abrigo possa ser montado em apenas 6 hrs, sem o uso de nenhuma ferramenta ou energia elétrica, além disso, duas unidades do abrigo podem ser transportadas dentro de um único contêiner.

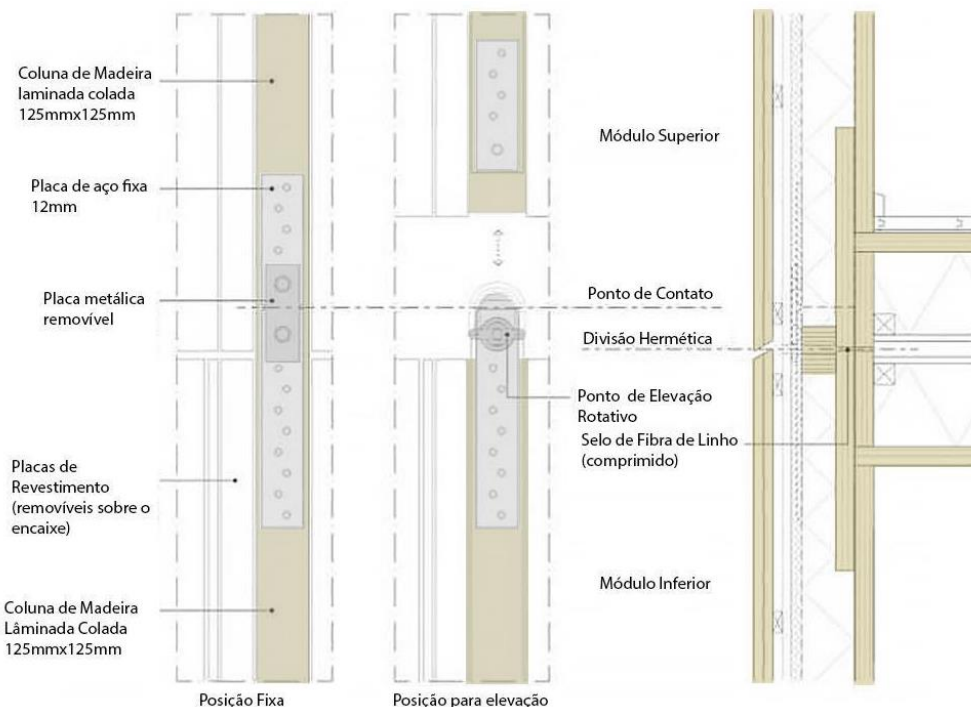
O Abrigo classifica-se, quanto a estratégia de implementação, na categoria top-down, já que o módulo abrange todo o sistema estrutural e o sistema de vedação do edifício, determinando todos os outros fatores do edifício.

As diretrizes projetuais do abrigo Liina foram direcionadas para facilitar o seu processo de fabricação, montagem e transporte. Percebe-se esse direcionamento pela escala dos módulos que facilita todos esses processos (Gosling et al., 2016). A utilização da estratégia do acoplamento rígido e flexível facilita também o processo de fabricação, possibilitando novas configurações para o edifício com a mudança de apenas um módulo, não sendo necessário modificar os outros. Entretanto, a implementação de uma arquitetura pouco modular dificulta a substituição das peças por outros componentes utilizados na indústria, dificultando a coordenação modular.

Kakoon

O abrigo Kakoon se baseia, assim como o Liina, em uma estratégia de modularidade baseada no acoplamento rígido e flexível. O abrigo possui interfaces comuns, sendo as principais: o encaixe metálico (figura Y) que une os módulos, e as dimensões horizontais que não podem ser alteradas, o que impossibilitaria o encaixe de um módulo ao outro. Entretanto, possui outras interfaces independentes como, por exemplo, o interior do abrigo pode ser moldado de acordo com a necessidade do ocupante.

Figura 16.



Fonte: Léa Pfister e Time do Kakoon, 2012. Modificado pelo autor.

Quanto a modularidade da arquitetura, Kakoon apresenta uma arquitetura pouco modular, pois seus módulos desempenham mais de uma função, sendo o módulo o próprio edifício. O abrigo possui uma coordenação modular média, suas peças internas são todas feitas com peças e encaixes já utilizados na indústria, as peças que devem ser fabricadas especificamente para esse projeto tratam-se dos encaixes entre os abrigos. Por isso, o abrigo possui maior facilidade de integração com outras peças produzidas pelo mercado do que o abrigo Liina.

Em contraponto com o abrigo Liina, os módulos do Kakoon podem ser classificados na escala do edifício. Módulos nessa escala tornam os processos de fabricação, montagem e transporte mais complexos do que módulos em escalas menores (GOSLING et al, 2016). Para o processo de montagem do abrigo são necessários equipamentos de grande porte e mão de obra especializada para o manuseio. A sua estratégia de implementação foi *Top-Down*, modularizando o edifício por completo, como se viu anteriormente, essa estratégia pode ser de mais difícil implementação por razões econômicas.

Devido a sua escala, o abrigo Kakoon possui maior complexidade na fabricação, montagem e transporte (GOSLING et al. 2016). Esses processos, principalmente o de transporte e montagem, necessitam de ferramentas complexas de grande porte, diferentemente do abrigo Liina. A sua arquitetura pouco modular dificulta a substituição de peças. Entretanto, a sua preocupação com a coordenação modular facilita o acesso a peças no mercado e a integração com outros sistemas já disponíveis.

Mutante

O abrigo mutante possui uma escala menor do que o abrigo Kakoon, porém, maior que o abrigo Liina, possui módulos que estão entre a escala do elemento e do componente. Os módulos nessas escalas tornam o processo de fabricação, montagem e transporte mais complexo que o abrigo Liina, porém mais simples que o abrigo Kakoon (GOSLING et al., 2016).

O Mutante, em contraponto com os outros, possui uma arquitetura modular, ou seja, os componentes exercem majoritariamente apenas uma função, isso permite a substituição dos elementos com maior facilidade e maior integração com elementos do mercado. Por isso, possui um alto nível de coordenação modular.

Optou-se pela estratégia de implementação *Bottom-up*, diferentemente dos projetos anteriores, modularizando apenas uma pequena parte do sistema estrutural do edifício, causando menor impacto no processo produtivo e sendo de mais fácil implementação.

O abrigo mutante possui uma arquitetura modular e maior coordenação modular o que pode facilitar o processo de fabricação, entretanto, a sua escala torna os processos de fabricação, montagem e transporte um pouco mais complexos. Por

outro lado, a sua estratégia de implementação *Bottom-up* e sua arquitetura modular tornam mais fácil a sua implementação e integração com elementos do mercado.

Habitação Modular no Pantanal

A habitação desenvolvida por Pasello (2020) classifica-se na escala do subcomponente, assim como o abrigo Liina. Um dos principais fatores determinantes para a escolha dessa escala foi a dificuldade de transporte, como dito anteriormente, o abrigo seria instalado em uma área remota do Pantanal, e todas as peças foram transportadas através de uma balsa. Portanto, era necessário que o processo de montagem e, principalmente, transporte fossem facilitados. Esse abrigo possui um baixo nível de integração com a cadeia de suprimentos, pois necessita da criação de uma nova rede de suprimentos para compor quase a integridade da sua estrutura, entretanto, o abrigo pode se integrar facilmente com outros sistemas adjacentes à estrutura produzidos no mercado.

Este abrigo possui uma arquitetura modular, pois os componentes estruturais realizam apenas uma única função. A estratégia de implementação foi a *top-down*, optou-se por modularizar todo o sistema estrutural do edifício.

A sua escala facilita o processo de fabricação, montagem e transporte, entretanto, o número elevado de peças requer uma logística complexa.

Conclusão

A partir da análise, montou-se o quadro 6. Pode-se perceber que, entre os quesitos de classificação há uma cisão entre os autores. Quanto à modularidade da arquitetura, o abrigo Liina e o Kakoon possuem uma arquitetura pouco modular, enquanto o projeto mutante e a habitação modular no Pantanal possuem uma arquitetura mais modular.

Quadro 6

Classificação dos abrigos				
Classificação	Liina transitional Shelter	Kakoon	Mutante	Habitação Modular no Pantanal
Modularidade da arquitetura	Pouco Modular	Pouco Modular	Modular	Modular
Integração com a cadeia de suprimentos e coordenação modular	Baixa	Média	Alta	Baixa
Escala dos Módulos	Escala do Subcomponente	Escala do Edifício	Escala do elemento/componente	Escala do subcomponente
Estratégia de Implementação	Top-Down	Top-Down	Bottom-up	Top-Down

Fonte: Autor, 2022.

2.6 Conclusão da revisão de literatura

A partir da revisão de literatura, conclui-se que a modularidade é um conceito amplo que muda dependendo da área em que é aplicado, por isso, neste trabalho, utilizar-se-á a conceituação de modularidade do produto e módulo proposta por Salvador (2007) e utilizar-se-á as características do módulo proposta por Gershenson et al. (2003). Constata-se que há duas principais estratégias para a aplicação da modularidade na construção civil, a da arquitetura modular do produto e a do acoplamento rígido e flexível.

Entretanto, ao se aplicar essas estratégias na construção civil surgem novos desafios e dificuldades que podem ser vistas através de uma perspectiva tridimensional ou a partir de uma perspectiva top-down e bottom-up, que, apesar de diferentes, não são excludentes. Este trabalho, visto de uma perspectiva tridimensional, foca no processo, porém, as três dimensões (processo, produto e cadeia de suprimentos) estão intimamente ligadas. Quanto a abordagem top-down ou bottom-up, utiliza-se uma abordagem top-down partindo de um dos maiores sistemas da edificação (sistema estrutural). Além disso, é importante alinharmos a coordenação modular aos processos, pois esta pode aumentar a racionalização.

Outro ponto importante abordado na revisão são os sistemas construtivos no Brasil, é necessário entender como o país se encontra em relação à industrialização dos sistemas construtivos em madeira. Percebe-se que o país caminha para uma época de maior industrialização, por isso é preciso estudar processos que relacionem a indústria e a obra, de modo a aumentar a racionalidade da construção.

Além desses fatores, é importante entender que existem outros que influem no processo da construção, neste trabalho serão considerados três principais fatores, fornecidos pela revisão de literatura: a escala dos módulos, o número de peças, minimização e a padronização do número de conectores.

3.0 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

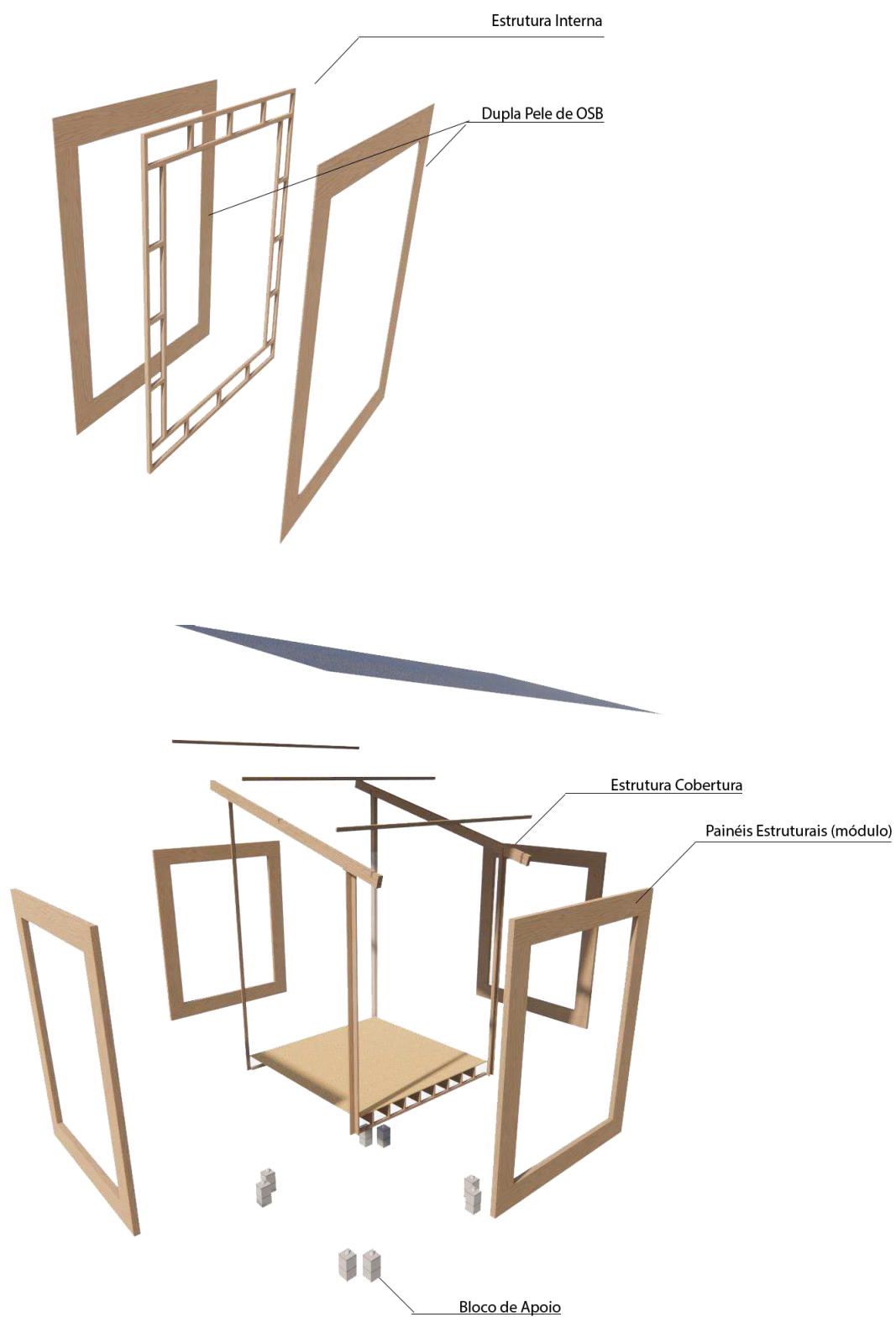
Este capítulo trata do desenvolvimento projetual do sistema estrutural em timberframe a partir das estratégias mencionadas na revisão bibliográfica: modularidade do produto e o DFMA. Este sistema será utilizado como objeto de estudo e análise no processo de fabricação e montagem.

3.1 Referência

Parte do processo de pesquisa foi desenvolver um projeto de uma estrutura em timberframe com os conceitos do DFMA e da modularidade do produto. Desenvolveu-se o projeto dessa estrutura a partir de referências projetuais, principalmente o projeto MUTANTE. O projeto foi escolhido como referência pois apresenta dois dos principais princípios do DFMA: Redução do número de partes e a redução e a minimização dos tipos de conectores e a sua quantidade. Além disso, o projeto mutante pode facilmente se encaixar nos princípios da modularidade do produto.

Para fins de estudo, recriou-se o modelo 3d do projeto mutante em software. O sistema estrutural do projeto mutante consistia em um único módulo estrutural de 2,75x2,75m (Figura 17) formado por uma estrutura interna de madeira e revestido por uma dupla pele de OSB. Esses quadros eram unidos, e após acrescentado ao assoalho e a cobertura (Figura 18) formavam uma edificação com estrutura em madeira formado pelos módulos (Figura 19). A ideia do mutante era a aplicação da modularidade e a simplificação do sistema estrutural a partir da criação de um único módulo estrutural que compunha toda a estrutura do sistema.

Figuras 17, 18 e 19



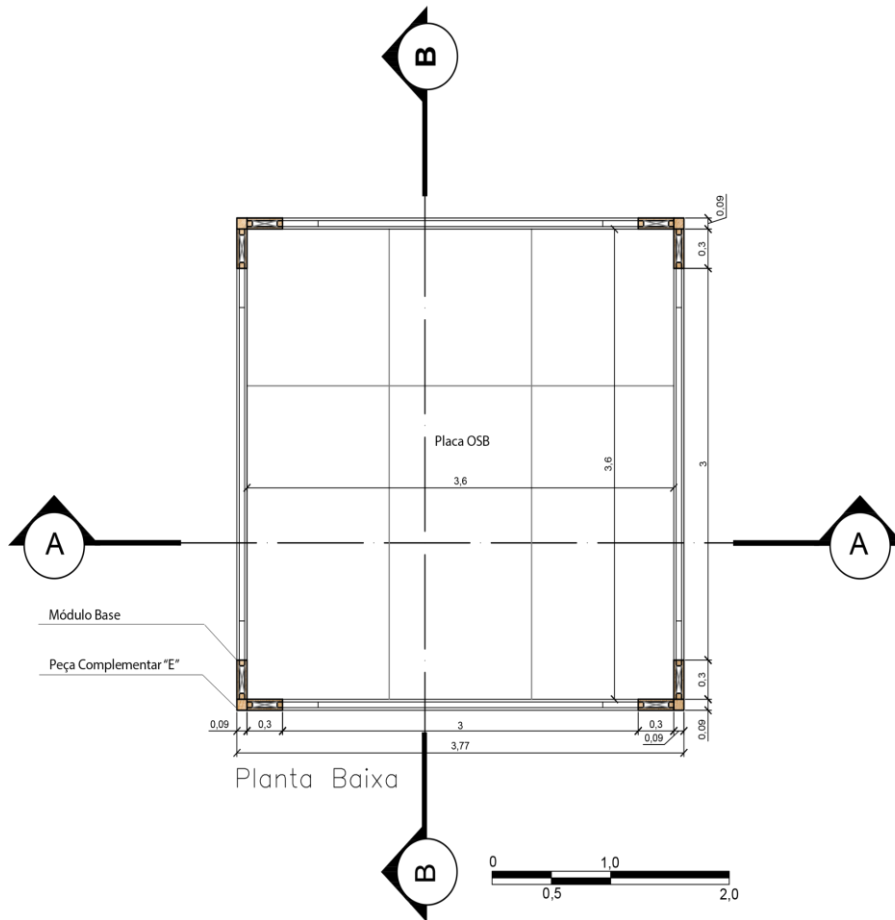


Fonte: Autor, 2021.

3.2 Concepção

Após a recriação do projeto mutante em software, fez-se uma análise a partir das estratégias estudadas na revisão de bibliografia a fim de propor um aprimoramento desse sistema. Observou-se que, apesar do projeto mutante trazer importantes conceitos do DFMA e da aplicação da modularidade do produto, o projeto possui módulos na escala do componente/elemento - conforme a classificação feita por Gosling et al. (2016) - o que pode aumentar a complexidade do processo de fabricação e montagem. Por esse motivo, optou-se por utilizar os conceitos do mutante de apenas um único módulo estrutural, entretanto reduzi-lo para a escala do subcomponente com o mínimo de peças possíveis. A proposta é criar um módulo de, aproximadamente, 3,75x3,75m (figura 20) com apenas um módulo base para compor toda a estrutura, essas medidas foram definidas a partir do tamanho comercial. Utilizar-se-á elementos já disponíveis na indústria de primeira transformação (serraria), como tábuas de madeira, de modo a termos apenas um único módulo que será replicado.

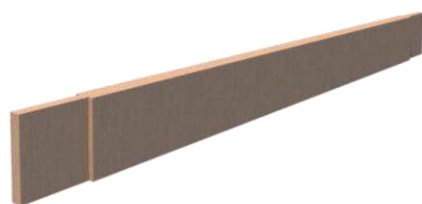
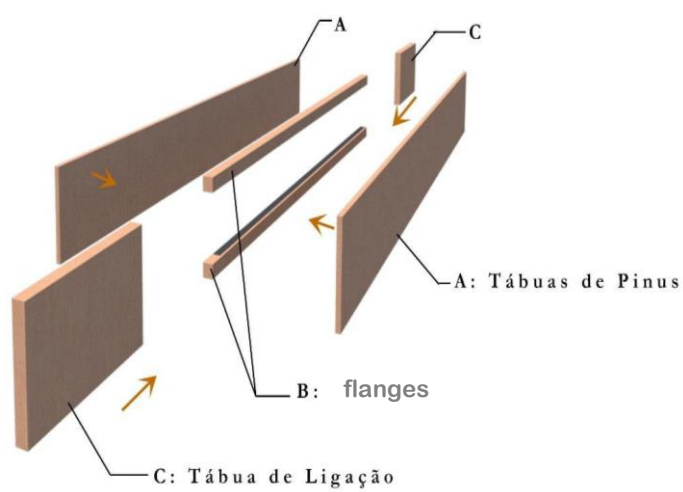
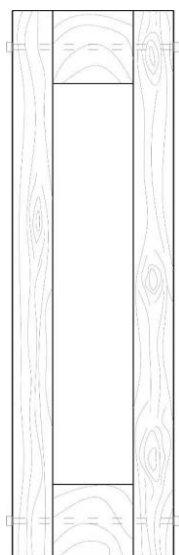
Figura 20.



Fonte: Autor, 2021.

O módulo base da estrutura será composto por duas tábuas de Pinus de 300x25x3 cm (A), essas tábuas são ligadas através de 2 flanges de 240x5x5cm (B), centralizadas na parte inferior e superior formando uma viga do tipo “caixão perdido” (figura 21; figura 22). Um segmento de prancha de 60x30x5cm (C) compõe as extremidades, adentrando a peça e também se projetando para fora, permitindo o encaixe com outros módulos (figura 22).

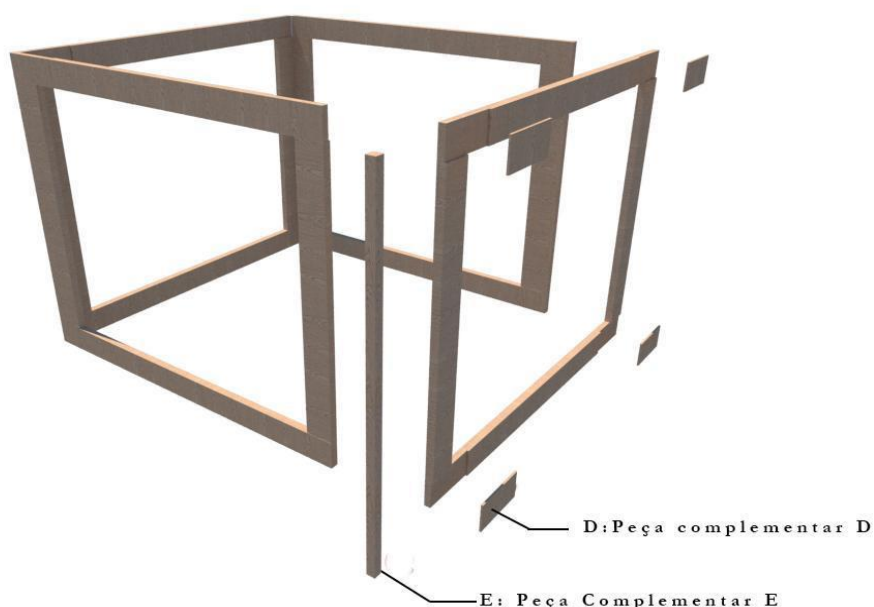
Figura 21, figura 22.



Fonte: Autor, 2021.

A partir deste único módulo é possível construir todo sistema estrutural do edifício com uso de apenas duas peças complementares - com exceção dos pisos. Quatro módulos se juntam para formar um quadro (figura 23), ligado por uma peça complementar (D). Posteriormente, esses quadros são encaixados formando a estrutura. A peça complementar “E” solidariza ligando um quadro ao outro garantindo integridade a estrutura (figura 23).

Figura 23.

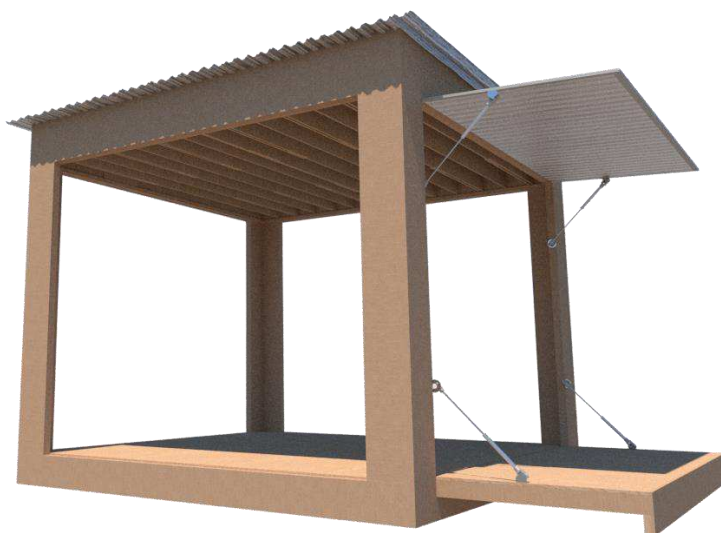


Fonte: Autor, 2021.

O sistema estrutural criado atinge os conceitos de modularidade do produto através da estratégia do acoplamento rígido e flexível. Portanto, o sistema estrutural possui parâmetros de interface comum que precisam ser “rígidos”, como os encaixes, a altura dos módulos e a sua espessura. Entretanto, o módulo também possui parâmetros que não possuem interface comum que podem ser “soltos”, como, por exemplo, o comprimento das dimensões do módulo na vertical ou horizontal podem ser alteradas sem alterar as demais peças do outro sentido. Isso permite gerar diferentes configurações do sistema como se observa a seguir (Figura 24; figura 25; figura 26). Nas imagens, podem-se ver diferentes configurações geradas a partir de pequenas mudanças nas dimensões dos módulos verticais, sem alterar o todo da estrutura. As figuras mostram diferentes configurações com o módulos único (Figura

24), Módulo com Expansão Vertical (Figura 25), e o módulo com expansões verticais e horizontais (Figura 26).

Figura 24, Figura 25 e figura 26





Fonte: Autor, 2021.

Além da peça principal e das peças complementares há o assoalho em madeira, que se difere levemente do projeto mutante (figura 27), o qual será ligado às vigas principais, a figura 28 mostra o projeto do assoalho atual. O assoalho é feito de tábuas de Pinus espaçadas de 30 em 30 cm. O projeto do assoalho é concebido para eliminar o desperdício com cortes desnecessários de material, possuindo tábuas em seu tamanho padrão (3m) e todas as peças serradas serão reutilizadas reduzindo o desperdício.

Figura 27, figura 28.



Fonte: Autor, 2021.

3.3 Conclusão do desenvolvimento projetual e das simulações em software

A partir do estudo do projeto mutante, propôs-se um projeto de um sistema estrutural que possui os dois principais conceitos do DFMA: a redução do número de partes, buscou-se transformar o sistema estrutural em um único módulo; e a minimização e a padronização do número de conectores, buscou-se utilizar o mesmo tipo de conexão havendo apenas dois tipos de conexão, a conexão entre os módulos que formam os quadros e a conexão entre os quadros. Apesar do projeto mutante ter base nesses conceitos, a escala dos seus módulos era muito grande o que pode aumentar a complexidade do processo de fabricação e montagem (Gosling et al., 2016), por isso buscou-se reduzir a escala dos módulos para a escala do subcomponente.

Utilizou-se também da ideia da modularidade do produto ao se definir parâmetros rígidos e parâmetros flexíveis do módulo possibilitando novas configurações. Deve-se ressaltar, entretanto, que a modularidade do produto necessita da comprovação dos conceitos de separabilidade e combinabilidade, conceitos que devem ser observados na parte prática do processo de montagem do experimento.

4.0 Experimento/protótipo

Após as simulações em software, iniciou-se a construção e análise do protótipo em tamanho real, este processo se dividiu em 3 principais etapas: Qualificação e preparação das peças de madeira; Processo de Fabricação dos módulos; Processo de Montagem.

A construção do protótipo em tamanho real foi fundamental para a análise de fabricação e montagem do protótipo criado, as análises foram feitas através de dois especialistas na área além da análise dos dados de tempo coletados durante o processo.

4.1 Primeira Etapa: Preparação e categorização das peças de madeira

Esta etapa do experimento consistiu em preparar e categorizar as peças de madeira antes da fabricação dos módulos. O processo de preparação consiste na secagem dessas peças, em aparelhar e cortar as peças de madeira. Primeiramente, efetuou-se o processo de aparelhamento da madeira através de uma Plaina desengrossadeira (figura 29), esse processo é fundamental para padronizar a espessura e promover o acabamento de superfície e nivelamento.

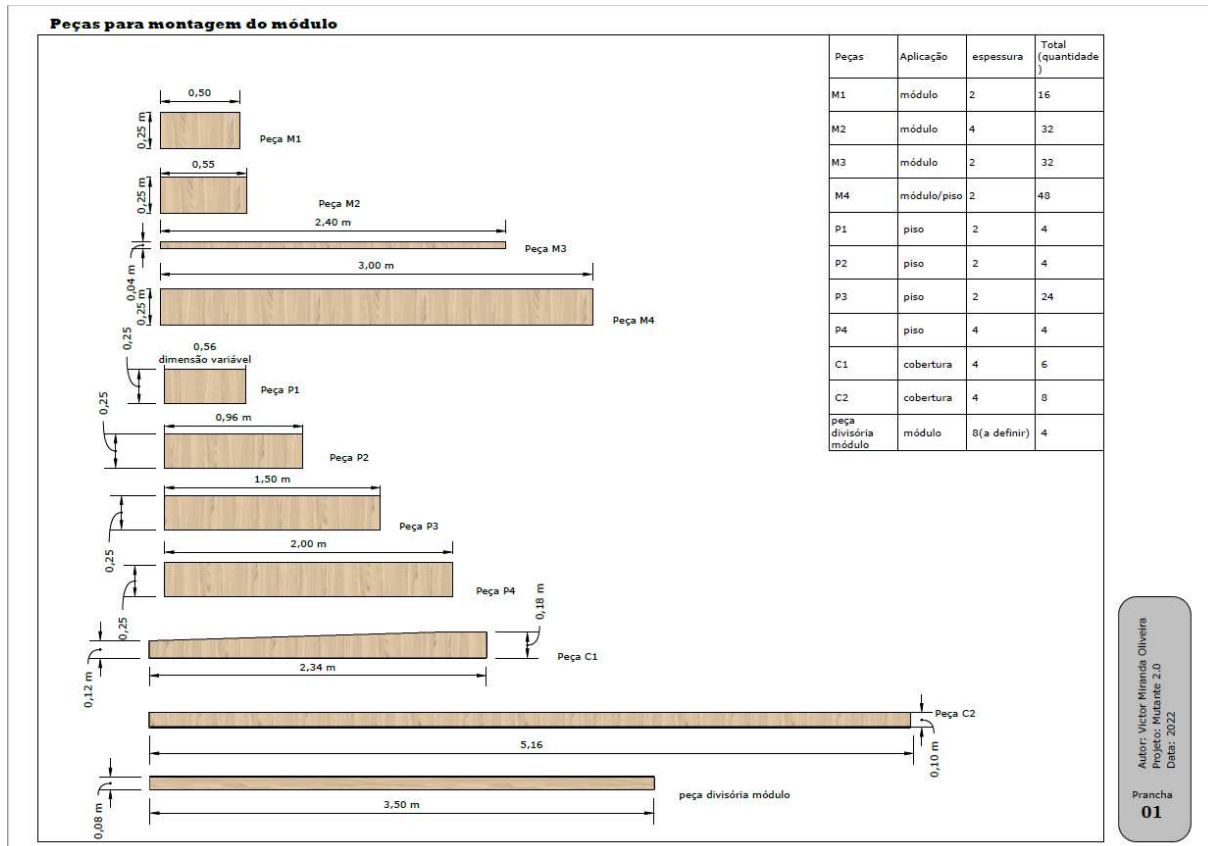
Figura 29.



Fonte: Autor, 2022

Após a usinagem da madeira, iniciou-se o processo de corte, essa etapa foi efetuada conforme mostra o gabarito (Figura 30). Os cortes das peças de madeira foram concebidos sempre buscando preservar as dimensões evitando cortes desnecessários, por exemplo, grande parte das tábuas utilizadas são tábuas de 300x25x2cm, dimensões encontradas no mercado. As dimensões não comerciais foram retiradas em outras peças, buscou-se assim garantir ao máximo a coordenação modular das peças.

Figura 30.



Autor: Victor Miranda Oliveira
 Projeto: Mutante 2.0
 Data: 2022
 Prancha
01

Fonte: Autor, 2022

Após a preparação das peças, iniciou-se o processo de classificação. A classificação mecânica foi utilizada com a finalidade de selecionar as peças de madeira com maior resistência para as partes mais solicitadas. Para tal objetivo utilizou-se como critério o Módulo de Elasticidade - MOE das peças. Para esse fim foi efetuado o teste de ultrassom na madeira e a aferição da densidade. Entretanto, antes da realização dessas etapas foi necessária a medição da umidade da madeira, que tem direto impacto na obtenção dos dados.

A medição de umidade foi feita através de um medidor de umidade digital por perfuração (figura 31). Após a constatação do alto teor de umidade de algumas tábuas, o conjunto foi submetido ao processo de secagem, onde as tábuas foram dispostas sobre apoios de madeira em local arejado com ventiladores, permitindo a máxima exposição da sua área de superfície chão e permitindo a sua ventilação, esse processo se estendeu até o alcance de teor de umidade por volta de 12% (Umidade recomendada para a realização do teste de ultrassom).

Figura 31.



Fonte: Autor, 2022

Após a estabilização da umidade nas peças, foi realizada a avaliação mecânica com a medição de MOE por meio do método NDT de ultrassom. De acordo com Paixão (2018), o ultrassom é um teste não destrutivo (NDT -non destructive Testing) baseado na emissão de ondas acústicas e ultrassônicas percorrendo um determinado meio, neste caso, uma peça de madeira. Segundo Nogueira (2007) O método ultrassônico se apoia na análise de propagação de uma onda e sua relação com as constantes elásticas da madeira. Em uma linguagem simplificada, o método consiste em criar no interior do corpo de prova uma ou várias ondas elásticas com uma sonda. As ondas se propagam com uma velocidade que depende de dois fatores: a direção da propagação e as constantes elásticas do material. Desta forma, através do teste de ultrassom foi possível encontrar o tempo que a onda sonora leva para atravessar a peça e, conseqüentemente, sua velocidade.

As vantagens da medição das propriedades da madeira pelo Ultrassom estão na sua facilidade de manuseio e medição e ao fato de ser um método não destrutivo. A medição com ultrassom foi feita através do posicionamento de sondas nas extremidades das peças de madeira. Para cada peça foram realizadas 3 medições (Figura 32) para se garantir a confiabilidade dos dados medidos.

Após a coleta, os dados foram colocados em uma tabela onde se aplicou a fórmula para determinação do Módulo de Elasticidade:

$$\text{MOEd} = \rho (12\%) \cdot V^2 \text{ (equação 1)}$$

Onde:

MOEd = módulo de elasticidade dinâmico (10- 6 MPa);

ρ (12%) = densidade da madeira a 12% de umidade (g/cm³);

v = velocidade da onda longitudinal (m/s).

Figura 32.



Fonte: Autor, 2022.

Além da realização do ultrassom, foi necessária a aferição da densidade de cada peça. A densidade pode ser calculada através da fórmula:

$$\delta = m/v \text{ (equação 2)}$$

Onde:

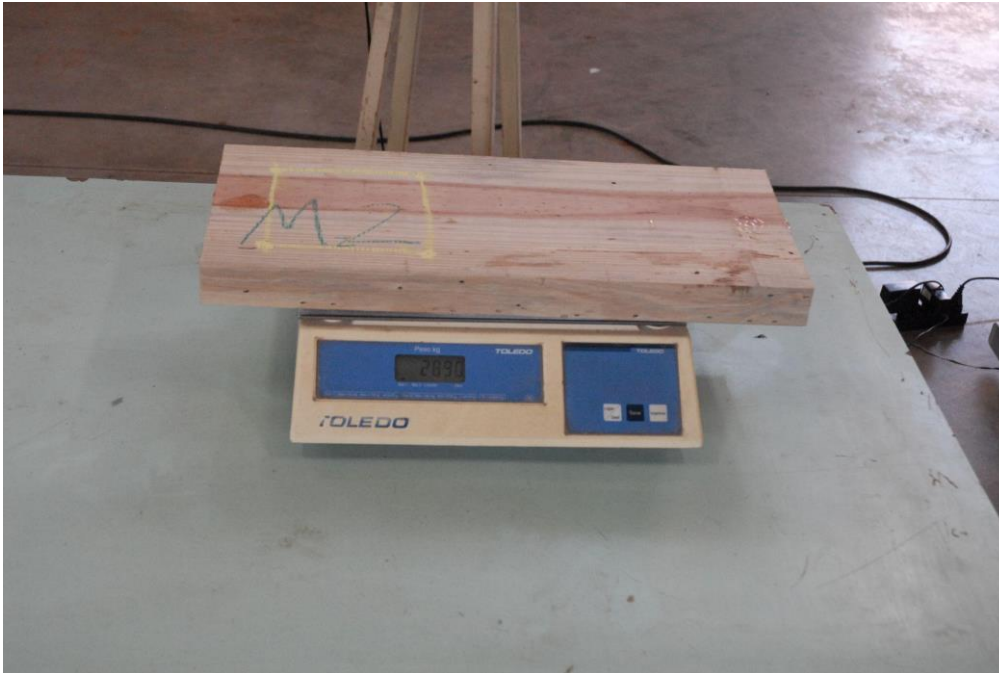
δ =densidade

m =massa em toneladas

v = Volume em km³

Assim, para o cálculo da densidade foi necessária a aferição da massa e do volume de cada peça. Deste modo realizaram-se a pesagem (Figura 33) e a aferição das dimensões das peças (Figura 34).

Figura 33 e Figura 34.



Fonte: Autor, 2022.

Após todas as medições realizadas foi possível encontrar o Módulo de Elasticidade MOE de cada peça. Os módulos de elasticidade das tábuas variaram de 3.016 MPa até 13.077 Mpa, isso evidencia que a madeira é um material orgânico com grande diversidade de propriedades mesmo dentro da mesma espécie, por isso a

avaliação das peças a sua organização em grupos com propriedades mecânicas semelhantes é fundamental para que o sistema estrutural funcione como o planejado. Após essa etapa, efetuou-se também uma classificação das peças com base nos dados obtidos na classificação visual. A classificação visual possui diversas etapas, entretanto, devido ao limite de tempo classificou-se apenas através do nós da madeira, buscou-se eliminar as peças com elevado número de nós principalmente as peças elementares da estrutura.

4.2 Segunda Etapa: Fabricação

Após a triagem das peças de madeira, realizou-se o processo de fabricação. Este processo consistiu em duas etapas:

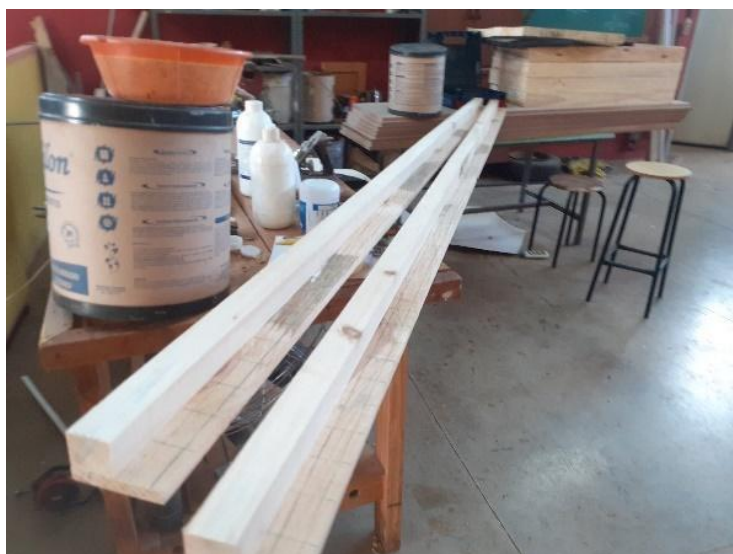
Primeira etapa - alinhamento:

consistiu na fixação das peças de madeira através de um Pinador Pneumático. essa etapa é fundamental para alinhar e ajustar as peças de madeira antes de sua fixação definitiva.

Segunda etapa - Fixação:

consistiu na fixação do módulo através de parafusos, para essa etapa, criaram-se dois gabaritos de aparafusamento alternados (um para cada lado do módulo) evitando que os parafusos não se encontrassem, isso se deve a alternância da posição dos parafusos (Figura 35, 36 e 37).

Figura 35, Figura 36 e Figura 37.





Fonte: Autor, 2022

4.2.1 Análise do Processo de Fabricação pela banca de especialistas

A análise do processo de fabricação foi feita de duas formas: através de uma banca de especialistas e pela análise dos dados do tempo de fabricação, este item visa discutir a análise da banca. A banca de especialistas foi composta por professores da Universidade Estadual de Londrina. Os especialistas chamados para avaliar o processo foram os professores: MSc Bruno José Olivari Pasello arquiteto e urbanista formado pela UEL, mestre em arquitetura e urbanismo, o qual, em sua dissertação de mestrado, discutiu a utilização da estratégia da modularidade do produto em uma habitação modular no Pantanal, atualmente atua como docente e doutorando na Universidade Estadual de Londrina (UEL) o segundo especialista convidado foi o Dr. César Imai, arquiteto e urbanista, doutor pela Universidade de São Paulo (USP) em arquitetura e urbanismo pós-doutorado pelo Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo - IAU/USP (2018), atualmente atua como docente na Universidade Estadual de Londrina (UEL).

O objetivo da banca avaliadora é analisar o processo de fabricação e montagem e avaliar o impacto das estratégias utilizadas (modularidade do produto e o Dfma) nos processos de fabricação e montagem.

A banca avaliadora acompanhou parte do processo de fabricação e respondeu a 4 perguntas:

1 - O sistema modular impactou o processo de fabricação?

2 - A redução do número de peças da estrutura a apenas um módulo impactou o processo de fabricação? Como?

3 – Qual a interpretação dos dados do tempo de fabricação.

4 – Se os participantes concordavam ou discordavam da seguinte afirmação: A produção de apenas uma peça para estrutura agilizou o processo de fabricação

O especialista Bruno Pasello preferiu escrever as respostas, enquanto o especialista César Imai preferiu responder de forma oral a qual foi transcrita.

1. O sistema modular impactou o processo de fabricação?

Resposta Bruno Pasello: Sim, o sistema modular afeta a fabricação pois permite uma simplificação e repetição das etapas construtivas. Notei inclusive a adoção de um gabarito de perfuração para auxiliar o processo de fabricação.

Resposta César: “Eu acho que o sistema modular pode impactar no sistema de construção, porque a ideia é que o processo de fabricação seja um processo mais controlado, mais repetitivo e mais racional [...], isso torna o processo mais eficiente. Então toda racionalização, toda industrialização e toda repetição torna o processo mais eficiente. Então o nosso carpinteiro vai fazer a primeira... na segunda, na terceira e na quarta ele já está muito mais eficiente [...]. Então sim, ele impacta no processo de fabricação, com certeza.”

Conclusão: Ambos especialistas concordaram que o sistema modular impactou o processo de fabricação. Para Pasello esse impacto se dá devido a repetição e a simplificação do processo construtivo. Imai ressalta que a modularidade torna o processo de fabricação mais controlado, repetitivo e racional. Pasello ainda ressalta a criação de um gabarito pelo marceneiro no processo de fabricação, a adoção de um gabarito único para a perfuração de todas as peças impede que o carpinteiro tenha que refazer um novo molde para cada peça, o que evita um retrabalho desnecessário. Caso houvesse um maior número de módulos isso exigiria a criação de novos gabaritos, ou até mesmo a marcação individual de cada peça, o que tornaria o processo mais trabalhoso e menos racional. Em outras palavras, o que torna esse processo mais repetitivo e racional não é apenas a modularidade, mas também o número de módulos.

2. A redução do número de peças da estrutura a apenas um módulo impactou o processo de fabricação? Se sim, como?

Resposta Bruno Pasello: Sim, a decomposição da estrutura em partes padronizadas tende a reduzir expressivamente o tempo de produção pois tipifica o processo fabril. Em um sistema de produção seriada, a redução do número de etapas impacta diretamente na velocidade, controle e qualidade da produção. No entanto, é importante enfatizar que a estrutura avaliada é composta não somente pelo módulo avaliado, mas também pelos seus módulos de ligação.

Resposta César : sem dúvidas, apenas um módulo simplifica muito o processo. Todo processo de fabricação [...] é um processo em que você transfere para alguém executar. Então você fabrica o módulo e o módulo sempre é o mesmo, quem vai montar esse módulo tem muito mais facilidade de entender a composição do conjunto. Então ter apenas um módulo, com uma única dimensão, simplifica muito, e simplificar é uma das chaves para aumentar a eficiência. Então simplificar aumenta a eficiência. Uma única peça, um único módulo, simplifica muito, então isso é muito bom.

Conclusão: Assim como previsto pela estratégia do Dfma, a redução do número de peças pode facilitar o processo de fabricação (Gbadamosi et al., 2019; Kim et al., 2016; Chen e Lu, 2018, Bansk et al., 2018; Safaa et al., 2019). Houve consenso entre a banca de especialistas que a redução do número de peças impactou o processo de fabricação. Segundo Pasello isso ocorre devido a tipificação do processo fabril, o que impacta na velocidade, controle e qualidade. De acordo com Imai isso também acontece devido a facilidade de o marceneiro compreender a composição e se adaptar ao processo de fabricação.

3. Qual a sua interpretação dos dados do tempo de fabricação?

Resposta Bruno Pasello: Constatei que a montagem do módulo pode ser dividida em duas etapas. Uma corresponde ao alinhamento e fixação provisória das peças constituintes do módulo e a outra que corresponde à fixação definitiva (feita através de 110 parafusos). Notei também uma grande diferença de tempo de trabalho entre elas. A fixação definitiva consumiu 24:33 minutos, enquanto o alinhamento consumiu 4:25 minutos. Se pensarmos no tempo global de trabalho, teremos aproximadamente 14% do tempo na fixação inicial e 86% na fixação definitiva. Este fato me permite constatar que seria pertinente estudar maneiras mais rápidas de fixar as peças do módulo. A utilização de uma cola poderia ser uma boa opção. Outro ponto que me chamou a atenção é a possível necessidade de

Resposta César Imai: Eu entendo que o tempo de fabricação [...] é muito rápido [...] pelo que seu carpinteiro está fazendo ali, me parece que é muito rápido. E por que é rápido? Porque as peças são simples. Então o fato de você ter um sistema que não tem muitas peças e que são peças simplificadas transforma o processo em uma sistemática [...] mais ágil. Então eu não sei quanto tempo que ele (vai levar para) montar aquela peça, mas pelo que estou vendo ali, em dez minutos ele monta a peça. Depois ele vai parafusar, ele vai fazer ajustes. Eu não sei quanto tempo ele demora ali no total, mas me parece que do jeito que está indo ali, a primeira montagem inicial, que ele faz com o pinador ele trava e depois ele faz os ajustes finos, com parafuso, com broca e com tudo mais. [...]

Todo mundo que trabalha o sistema de fabricação em série, você percebe que o tempo diminui, porque a pessoa vai apenas fazer uma função, que é parafusar; a outra vai apenas fazer uma função, que é alinhar; a outra vai apenas fazer uma função, que é pinar. Então cada pessoa, em cada etapa da fabricação em série, transforma aquilo em uma eficiência violenta [...].

Conclusão: Quanto ao tempo de fabricação, ambos os autores constataram a existência de duas etapas, a etapa de alinhamento e a segunda etapa de fixação. Pasello argumenta que a segunda etapa levou uma quantidade muito grande em relação a primeira, sugerindo a utilização de novas formas de fixação das peças do módulo como a cola. Pasello também ressalta as dificuldades da produção de peças, as peças apresentam imprecisões devido ao método artesanal de fabricação por isso se necessita de um processo mais rápido e com maior precisão. Imai ressalta que as peças são produzidas de forma muito rápida o que ocorre devido a simplificação e a redução do número de peças como previstos pelo uso das estratégias do Dfma (Gbadamosi et al. (2019), Kim et al. (2016), Chen e Lu (2018), Bansk et al. (2018), Safaa et al. (2019)).

4. Você concorda ou discorda com a seguinte afirmação: A produção de apenas uma peça para estrutura agilizou o processo de fabricação.

Resposta Bruno Pasello: Concordo em parte já que acredito que o sistema não será composto de apenas uma peça e sim pelo módulo apresentado e seus módulos complementares de ligação.

Resposta César : Sim, concordo plenamente, e eu acho que é isso. A ideia é: simplificação garante maior racionalidade, maior eficiência temporal e maior facilidade de compreensão da mão de obra que vai montar, porque esse processo de fabricação depende do treinamento da mão de obra, e quanto mais simples for a peça que a mão de obra vai montar, menos ela tem que pensar em como vai montar. Então todo trabalho que é feito de maneira repetitiva, ele é feito muito mais rapidamente e torna o processo muito mais eficiente em termos de custo e benefício.[...] Então cada pessoa ao fazer isso (a mesma função) sistematicamente durante trezentas, seiscentas vezes por dia, sempre no mesmo modelo, você torna aquilo muito eficiente, você acha formas de fazer rapidamente. E por esse motivo que você tem que identificar com muita atenção o tempo que o seu carpinteiro, o tempo que o seu marceneiro, está fazendo no primeiro e no décimo sexto. E sim, uma peça só simplifica tremendamente.

Conclusão: Houve um consenso que a redução do número de peças da estrutura confere maior racionalidade e eficiência temporal. Imai ressalta que isso ocorre pois o processo de fabricação depende do treinamento da mão de obra e quanto mais simples e repetitivo mais rápido esse processo se torna. Entretanto, Pasello argumenta que a estrutura não é apenas formada por apenas um módulo, mas também pelos “módulos de ligação” se referindo as peças de ligação D e E.

4.2.2 Análise do tempo de fabricação

Além da análise pela banca de especialistas, fez-se uma análise do tempo de fabricação de cada módulo, esses dados foram tabelados e divididos nas duas etapas descritas anteriormente: a etapa de alinhamento (primeira etapa) e a etapa de fixação (segunda etapa) para melhor análise e entendimento. Cada etapa foi cronometrada individualmente e inserida no Quadro 7

Quadro 7: Tempo de trabalho do processo de fabricação

	Módulos	Tempo Primeira Etapa (alinhamento)	Tempo Segunda Etapa (fixação)	Tempo Total
Dia 01	Módulo 01	00:10:26	00:54:35	01:05:01
	Módulo 02	00:10:10	00:39:21	00:49:31
Dia 02	Módulo 03	00:09:43	00:40:12	00:49:55
	Módulo 04	00:08:03	00:37:07	00:45:10
Dia 03	Módulo 05	00:04:25	00:24:35	00:29:00
	Módulo 06	00:05:28	00:19:36	00:25:04
	Módulo 07	00:03:10	00:16:40	00:19:50
Dia 04	Módulo 08	00:05:57	00:21:12	00:27:09
	Módulo 09	00:04:51	00:22:47	00:27:38
	Módulo 10	00:04:09	00:16:33	00:20:42
Dia 05	Módulo 11	00:03:47	00:20:54	00:24:41
	Módulo 12	00:03:27	00:20:23	00:23:50
	Módulo 13	00:02:22	00:18:49	00:21:11
Dia 06	Módulo 14	00:05:38	00:19:26	00:25:04
	Módulo 15	00:03:36	00:19:54	00:23:30
	Módulo 16	00:03:55	00:15:50	00:19:45

Fonte: Autor, 2022.

4.2.2.1 Análise Primeira Etapa: Alinhamento

Ao se analisar a primeira etapa, percebe-se uma redução de 6 minutos e trinta e um segundos entre o tempo de fabricação do primeiro e do último módulo, havendo uma redução de 62%. Notou-se também que a cada início de dia o tempo parece ser maior, indicando que a pausa de um dia para o outro desacelera o processo, e que ao longo do dia o processo acelera-se. Devido a esses fatores, elaborou-se um novo quadro (quadro 8) para se analisar as variações de tempo que ocorrem dentro do mesmo dia de trabalho. Ao se analisar o quadro 8, percebe-se que, durante o mesmo dia, houve uma redução do tempo de fabricação entre a primeira e última peça do dia.

Quadro 8: Análise da diferença do tempo entre a primeira e a última peça do dia durante a primeira etapa de fabricação.

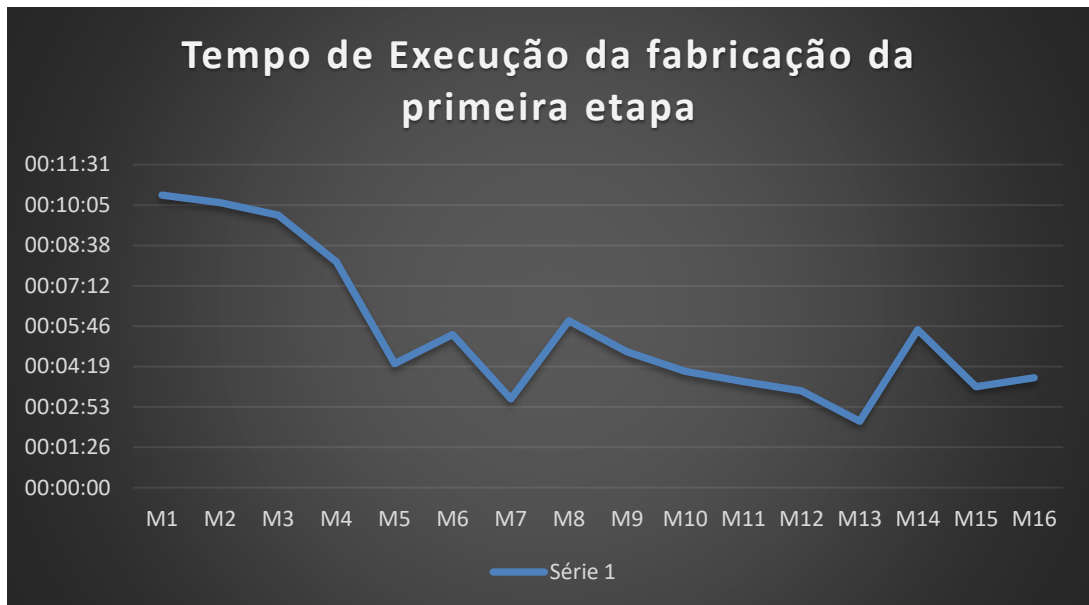
Dia	Diferença de tempo entre a primeira e a última peça fabricada no dia (Etapa 01: Alinhamento)	% de redução
Dia 01	00:00:16	2,5%
Dia 02	00:01:40	17%
Dia 03	00:01:15	28%
Dia 04	00:01:48	30%
Dia 05	00:01:25	37%
Dia 06	00:01:43	30%
Média		24%

Fonte: Autor, 2022.

A partir da tabela percebe-se que em média o processo se acelera 24% ao longo do dia, isso mostra que ao longo de um mesmo dia o processo tende a ter um aceleração no seu processo de fabricação.

Ao se inserir os dados do tempo da primeira etapa de fabricação percebe-se que existe uma redução drástica do tempo de fabricação (**Gráfico 01**) dos primeiros módulos até atingir um ponto de equilíbrio em que existem variações menores. Percebe-se que o gráfico possui picos que geralmente estão relacionados ao início do processo de montagem do dia, indicando que as pausas de um dia para o outro desaceleram o processo de fabricação; conforme se produzem peças em série o processo se acelera tornando-se mais eficiente.

Gráfico 01.



Fonte: Autor, 2022

4.2.2.2 Análise Segunda Etapa: Fixação

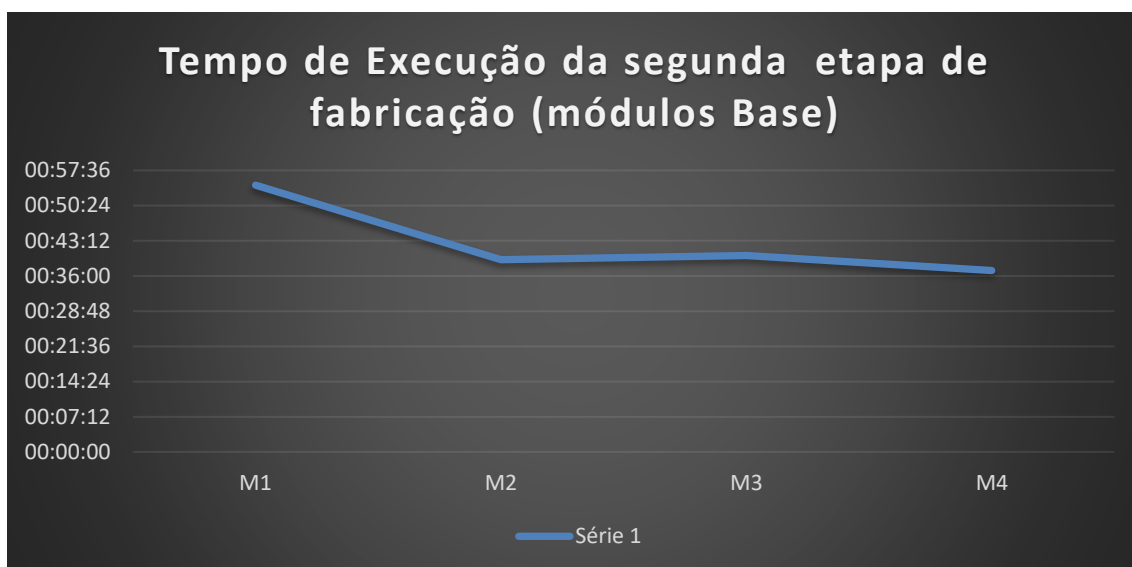
A segunda etapa do processo de fabricação consiste em dois tipos de execução, No quadro 7, os dados em amarelo mostram os primeiros processos para a fabricação dos módulos mais solicitados, aqueles que sustentarão o assoalho, que aqui serão chamados de módulos da base. Estes módulos possuirão um maior número de parafusos aumentando a resistência da do componente aos esforços de cisalhamento. Os módulos restantes não serão expostos a estes esforços, por isso possuem um número menor de parafusos, conseqüentemente, são fabricados em menor tempo, estes serão chamados de módulos corpo. Os módulos da base possuem o dobro (248) de parafusos em comparação aos módulos do corpo (124).

4.2.2.2.1 Módulos da Base

Os módulos da base apresentam um maior tempo na segunda etapa de fabricação em relação aos módulos do corpo, em conseqüência disso, tem-se um tempo total maior. Ao se analisar os dados do tempo desses módulos na segunda etapa, percebe-se que houve uma redução de 32% entre o primeiro o tempo de fabricação do primeiro do último módulo fabricado, conforme evidenciado no quadro 9.

Quadro 9; gráfico 2.

Dia	Diferença de tempo entre o primeiro e último fabricação (Etapa 01)	% de redução
Dia 01	00:15:14	27,9%
Dia 02	00:03:05	7,6%
Média		17,75%



Fonte: Autor, 2022.

A análise dos dados sugere que houve uma redução significativa entre a fabricação do primeiro e do último módulo (32%), o primeiro módulo a ser fabricado apresentou um tempo de fabricação muito superior aos outros. Ao se observar o gráfico 2 percebe-se que a partir do segundo módulo o tempo de fabricação se estabiliza. Apesar de haver uma estabilização após a produção do segundo módulo, ainda há uma variação de significativa de 7,6% no tempo entre os módulos fabricados no início e no fim do segundo dia.

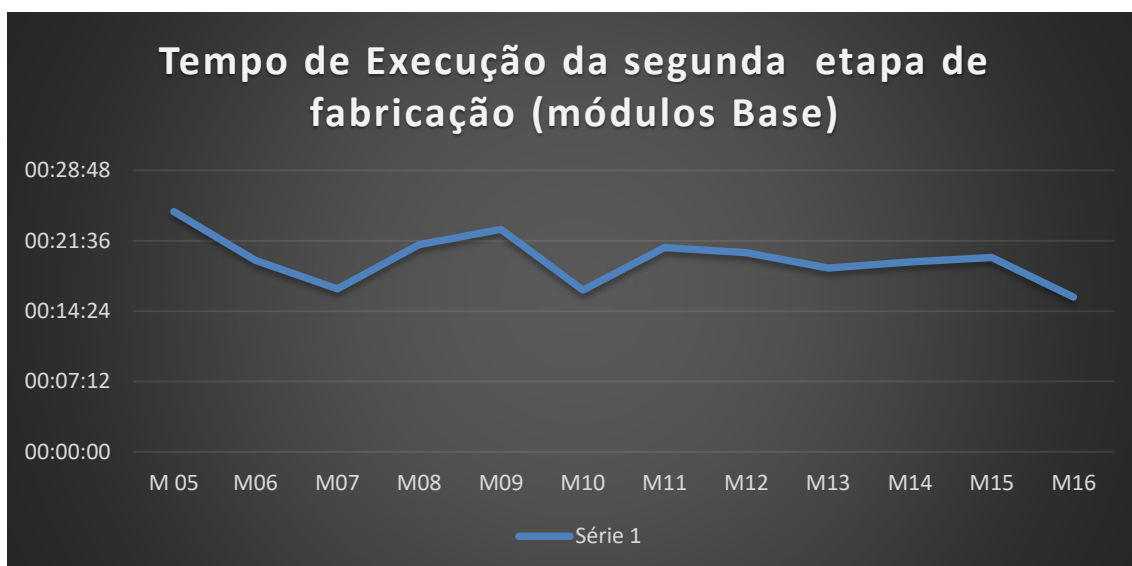
4.2.2.2.2 Módulos do Corpo

Os módulos do corpo possuem uma quantidade menor de parafusos, apesar desse fator não impactar diretamente a primeira etapa do processo de fabricação ela possui um impacto na segunda etapa o que altera o tempo total de fabricação de cada módulo. Na segunda etapa do processo de fabricação, os módulos do corpo apresentaram uma variação de 8 minutos e 45 segundos entre o primeiro e último módulo a serem fabricados, o que representa uma redução de 35,6% no tempo de

fabricação. Apresentam também uma redução significativa durante o dia, como evidenciado no quadro 10.

Quadro 10 e gráfico 3.

Dia	Diferença de tempo entre o primeiro e último fabricação (Etapa 01)	% de redução
Dia 01	00:07:55	32,2%
Dia 02	00:04:39	21,9%
Dia 03	00:02:05	9,9%
Dia 04	00:03:36	14,2%
Média		19,5%



Fonte: Autor, 2022.

Observa-se pelo gráfico 3 e pela tabela 10 que o tempo de fabricação dos módulos corpos tende a reduzir com a experiência da equipe e se estabilizar com menores flutuações de tempo diárias.

4.2.3 Conclusão Processo de Fabricação

4.2.3.1 Impactos da Modularidade e do DFMA

Conclui-se que o processo de modularidade, padronização e a utilização dos conceitos do DFMA na estrutura de timberframe proposta pelos autores atingiu os resultados esperados, os conceitos de simplificação e repetição, como é constatado

por Imai e Pasello, conferiram maior racionalidade para o processo. Ressalta-se que a redução do número de peças assim como indicado por Gbadamosi et al. (2019), Kim et al. (2016), Chen e Lu (2018), Bansk et al. (2018), Safaa et al. (2019) interferiu no processo de fabricação de acordo com os especialistas, conferindo maior racionalidade, maior eficiência temporal e maior facilidade de compreensão da mão de obra que vai montar. A análise do tempo de montagem evidencia como o tempo de produção de uma peça se reduz gradualmente, sendo afetado também pelas pausas de um dia para o outro, tendendo a atingir uma zona de equilíbrio com menores flutuações.

4.2.3.2 Escala do componente

Conforme dito Gosling et al. (2016) a utilização do módulo na escala do subcomponente facilita o processo de fabricação, a redução dos módulos da escala do elemento do antigo mutante para a escala do subcomponente facilitou o manuseio e a complexidade da montagem. o módulo nessa escala pode ser fabricado e manuseado e transportado por apenas 2 pessoas possuindo um peso médio de 20kg, e dimensões de 325x24x8 cm. Caso fosse utilizado a escala do elemento como no projeto mutante, e formássemos um quadro rígido teríamos um módulo com dimensões de 350x350x8 cm com um peso médio de 80 kg, sendo necessário 4 pessoas para transportá-lo na horizontal devido as suas dimensões e seu centro de massa. Além das dificuldades de transporte da usina até a obra.

4.2.3.3 Dificuldades e GAPS

Uma das principais diferenças da indústria da construção civil para as outras indústrias de produção em massa é a sua cadeia de suprimentos temporária (Rocha et al.,2015). Pasello (2020) chama a atenção para esse problema no seu trabalho, evidenciando em seu sistema modular em aço construído no Pantanal, que foi necessária a criação de novos gabaritos a serem descartados após a execução do projeto. Neste experimento utilizou-se da estratégia da coordenação modular, utilizando-se peças que já existem no mercado para minimizar o impacto na cadeia de produção, entretanto, não houve como contornar a criação de gabaritos específicos para a fabricação das peças que, apesar de serem reutilizáveis, não terão mais uso após a execução do projeto e interferindo na cadeia de produção e diminuindo a racionalidade do processo.

Outras dificuldades encontradas neste trabalho foram encontradas pelo processo artesanal utilizado. Devido à baixa precisão dos equipamentos de corte foram necessários diversos ajustes nas peças (Figura 38) o que foi observado por Pasello. Esses ajustes interferem no processo e dispendem uma grande quantidade de tempo e interferem na cadeia de produção, além disso, interferem nas medidas dos elementos, alterando o projeto original. Uma possível solução dada por Imai é a consideração desses ajustes já na etapa projetual, desta forma, poderia se propor que uma tábua de 25 cm, terá no final uma espessura de 23,5 cm, deixando uma margem para esses ajustes não causando problemas nas dimensões dos projetos, e já inserir esses ajustes na linha de produção.

Figura 38.



Fonte: Autor, 2022.

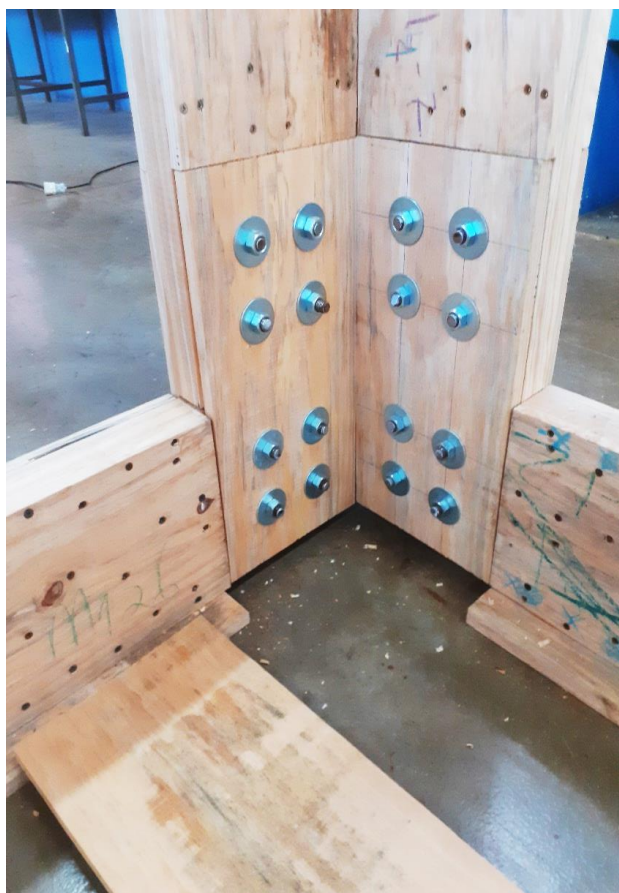
4.3 Terceira Etapa: Montagem

Após a finalização da fabricação das peças procedeu-se com a montagem do módulo, antes de se mencionar o processo de montagem, devemos entender um dos principais pontos na modularidade do produto: as conexões. Como foi visto anteriormente na estratégia do acoplamento rígido e flexível (Salvador, 2007), um produto com arquitetura modular deve possuir parâmetros rígidos e parâmetros

flexíveis. Tem-se o conhecimento (Salvador, 2007) que para o funcionamento dessa estratégia ocorra de forma adequada, os parâmetros flexíveis devem ser, na maioria dos casos, ligados ao funcionamento interno do módulo e que não interajam diretamente com os parâmetros dos outros módulos. Em oposição, os parâmetros ligados a conexão entre os módulos devem ser rígidos, pois só dessa forma os módulos poderão se conectar e interagir formando um todo. Além disso, Tan Tan et al. (2020) evidencia que a facilitação no processo de montagem ocorre quando reduzimos o número de conexões e a simplificamos.

Devido a esses fatores, buscou-se criar uma conexão que seria facilmente montável e facilmente desmontável, criou-se assim uma conexão formada por 8 conectores feitos a partir do corte de barras roscadas (Figura 39) fixados através de porcas. Os parafusos são dispostos no formato de um quadrado, esse formato permite que a ligação possa ser rotacionada (figura 40), mudando a configuração do módulo.

Figura 39 e Figura 40



Fonte: Autor, 2022.

A mudança na orientação da ligação acarreta também a mudança no formato do módulo, caso a ligação seja feita na vertical, configuração 1 (Figura 40; figura 41), tem-se um módulo com uma altura total de 3,75 m e uma planta baixa com área de 12,25 m². Entretanto, se o encaixe for feito na horizontal, configuração 2 (Figura 39; Figura 42), tem-se um módulo com 4 metros de altura total, e uma planta de 14,06 m².

Figura 41 e Figura 42.



Fonte: Autor, 2022

O módulo foi montado 3 vezes e desmontado duas, a primeira vez o módulo foi montado na configuração 1, levou-se dois dias de trabalho de 8 horas para a montagem completa da estrutura. Posteriormente, o módulo foi desmontado e concomitantemente montado na configuração 2, esse processo de desmontagem e montagem durou um dia de trabalho de 8 horas. Posteriormente, efetuou-se a segunda desmontagem, esse processo de desmontagem durou 47 minutos e 59 segundos, considerando a estrutura do assoalho nesse processo. Finalmente, o módulo foi montado na configuração 2, esse processo incluiu a execução da fundação de apoio, a montagem da estrutura, assoalho e cobertura. Essas etapas foram acompanhadas por especialistas que responderam às perguntas sobre os impactos das estratégias utilizadas no processo de montagem da estrutura.

4.3.1 Processo de Montagem

O primeiro passo para a montagem é a combinação dos módulos em quadros (Figura 43). Os módulos são dispostos em forma de um quadro e dispostos em suportes de concreto para facilitar o processo de ligação de suas extremidades. Após a fixação dos parafusos é feito o esquadramento do quadro (Figura 44). Em seguida os parafusos são apertados para a fixação definitiva. A média do tempo de montagem de cada quadro foi de 17min e 02s, totalizando um tempo total de montagem dos quadros de 1h 08min e 06s.

Figura 43 e Figura 44.





Fonte: Autor, 2022.

Após montado, o Quadro pode ser transportado horizontalmente por um grupo de 4 pessoas (Figura 45). Os quadros são dispostos ao lado do local de montagem. Após a disposição dos 4 quadros, é feito o içamento da estrutura (Figura 46 e figura 47) são necessárias duas pessoas para içar a estrutura, entretanto, é necessário se levantarem dois quadros formando um L para que a estrutura se mantenha aprumada, para isso é necessário apoiar e manter a estrutura até o levantamento do segundo quadro. Essa etapa levou 19min e 59s.

Figura 45, figura 46 e figura 47.



Fonte: Autor, 2022.

Após a montagem do módulo se procedeu ao nivelamento dos apoios, (Figura 48) o que levou 21min e 23s.

Figura 48.



Fonte: Autor, 2022.

Após o processo de nivelamento é feita a montagem da estrutura do assoalho (Figura 49; figura 50) a estrutura do assoalho foi feita em tábuas Pinus, essa estrutura foi pré-fabricada e é dividida em 3 módulos para facilitar o seu manuseio e transporte, posteriormente colocou-se placas de madeirite previamente recortadas para compor o piso (Figura 51). A sua montagem levou 45min e 22s.

Figura 49, figura 50 e figura 51.





Fonte: Autor, 2022.

Posteriormente, executou-se a montagem da cobertura. A estrutura da cobertura é composta por uma estrutura mista de steelframe e caibros de madeira (Figura 52) o alçamento da estrutura, devido a seu baixo peso, foi feito manualmente sem o uso de máquinas. Seu alçamento e fixação levaram 3h 37min e 39s. Sendo o processo mais demorado.

Figura 52.



Fonte: Autor, 2022.

Após a fixação da estrutura da cobertura, iniciou-se a disposição das telhas e a sua fixação (Figura 53), processo que levou 2h 15min e 34s.

Figura 53.



Fonte: Autor, 2022.

Após a finalização de todos os processos ainda foi feita a ancoragem da estrutura e um ajuste final de nivelamento (Figura 54) que levou 1h 28min e 21s.

Figura 54.



Fonte: Autor, 2022.

4.3.2 Tempo de montagem

O tempo de montagem de cada etapa foi cronometrado e transcrito para o quadro 11. No quadro pode-se analisar que o tempo de montagem final foi de 10h 08min e 24s. Isso mostra que o sistema total pode ser montado muito rapidamente, quando se refere apenas à estrutura (objeto de estudo desse trabalho) percebemos também a sua agilidade. Os quadros podem ser montados e içados em 1h 28min e 5s. Isso revela o impacto da modularidade no tempo de montagem do sistema estrutural em madeira.

Quadro 11.

Etapas	Tempo de Montagem
Fundação: Nivelamento em relação ao bloco	00:12:00
Montagem quadro 1	00:22:15
Montagem quadro 2	00:11:48
Montagem quadro 3	00:17:11
Montagem Quadro 4	00:16:52
Montagem dos quadros na fundação parte 1 (levantamento e sustentação)	00:10:26
Montagem dos quadros na fundação parte 2 (Alinhamento e fixação definitiva)	00:09:33
Nivelamento	00:21:23
Encaixe e fixação o Assoalho	00:45:22
Içamento e fixação da estrutura da cobertura	03:37:39
Fixação das Telhas	02:15:34
Ancoragem do módulo na fundação	01:28:21
Total	10:08:24

Fonte: Autor, 2022.

Analisando o quadro podemos ver que o tempo desde o início montagem do quadro 1 até a montagem dos quadros na fundação (Tempo de montagem do sistema estrutural) ocupa 14,4% do tempo de montagem total. A parte mais longa foi o içamento e a fixação da estrutura da cobertura foi de 35% do tempo total, seguido da fixação das telhas, 22% do tempo total, portanto, o processo total da cobertura representou 57% do tempo total de montagem. outro ponto importante é observar que

o nivelamento da estrutura atrasou o processo representando 5,4% do tempo de montagem.

Pode-se verificar que o sistema estrutural modular em timberframe desenvolvido pode ser montado em 1h 28min e 05s e pode ser desmontado em 47min e 59s. Isso demonstra a velocidade da modularidade e da pré-fabricação em relação a sistemas estruturais mais artesanais.

4.3.3 Manuseio e Recursos

Este item abrange o manuseio e os recursos necessários para a montagem, é essencial quando avaliamos a complexidade da montagem analisarmos se o item pode ser facilmente manuseado e os recursos necessários para a sua montagem.

Ao se abordar o manuseio das peças é elementar sabermos o peso da carga. Em 1990, o National Institute For Occupational Safety and Health (NIOSH) propôs que como limite máximo de peso em condições ideais para um trabalhador levantar de, aproximadamente, 23 kg, já a comunidade Europeia entende como limite máximo de peso a ser carregado por uma pessoa de 25kg. De acordo com Boocock e Pinder (2012) o MAWL (Maximum Acceptable weight of lift), ou o peso máximo aceitável para uma pessoa levantar depende de diversos fatores, como a idade, o sexo, o número de repetições que a carga será levantada, entre outros. Portanto, é necessário um estudo mais profundo sobre o tamanho dos módulos e o seu peso ideal o que não é o intuito desse trabalho, neste item faremos apenas a descrição do peso dos módulos e quantas pessoas são necessárias para manuseá-lo.

O módulo base possui, 325x25cm (Figura 55) possui, em média 20 kg, porém, devido ao seu comprimento, é mais facilmente carregado por duas pessoas. O quadro (Figura 56) completo possui cerca de 80kg, tem as dimensões de 3,75x3,25 m e pode ser manuseado por 4 pessoas.

Figura 55 e Figura 56.



Fonte: Autor 2022.

O quadro foi projetado de modo a utilizar o mínimo possível de ferramentas. Para a montagem de cada quadro necessita-se apenas de chaves de 19mm para ajustar os parafusos. Para a ligação dos quadros é necessária uma parafusadeira, neste caso, à bateria, logo, não foi necessário utilização da rede elétrica local.

4.3.5 Avaliação dos especialistas

Os especialistas convidados na etapa de fabricação, Bruno Pasello e César Imai, participaram da avaliação do processo de montagem respondendo a 6 perguntas:

- 1- Sabendo dos conceitos de modularidade do produto adotados pelo autor, a modularidade do produto impacta o processo de montagem do sistema estrutural? Se sim, de quais formas?**
- 2- Qual a complexidade da montagem dos módulos? Pode ser facilmente montável?**
- 3- Qual a complexidade da desmontagem do módulo? Pode ser facilmente desmontável?**
- 4- A escala do módulo facilita no processo de montagem?**
- 5- A redução do número de módulos do sistema facilita a logística de montagem e transporte? Se sim, de quais formas?**
- 6- Quais adversidades específicas encontradas em relação ao material?**

A partir dessas 6 perguntas buscou-se analisar o impacto de 3 fatores na montagem: Como a modularidade do produto impactou o processo de montagem; como a escala dos módulos impactou a montagem; Como as estratégias adotadas pelo Dfma impactaram a montagem.

1- Sabendo dos conceitos de modularidade do produto adotados pelo autor, a modularidade do produto impacta o processo de montagem do sistema estrutural? Se sim, de quais formas?

Resposta Pasello: Sim, foi possível constatar que o nível de modularidade do sistema estrutural proposto (módulos não volumétricos) impactou o processo de montagem nos seguintes pontos:

- Redução do tempo de montagem devido à pré-fabricação dos módulos;
- Redução do risco de acidentes devido à diminuição do processo construtivo no local;
- Redução do desperdício de material devido à otimização dos módulos na etapa prévia de fabricação;
- Aumento da precisão dimensional da estrutura.

Resposta Imai: [...] A modularidade é extremamente vantajosa para a montagem. Enquanto se tiver uma previsibilidade que o módulo é sempre uma questão regular se tem uma regularidade, a mão de obra é treinada no momento em que ela começa a fazer. Você pode fazer isso com teste, pré-teste, como uma experiência ou simplesmente só com um treinamento. Mas a partir da repetição dessas montagens e como é sempre o mesmo módulo, isso facilita muito a compreensão da mão de obra que vão montar. Então, modularidade e repetição garantem a eficiência e a redução de custos no tempo da montagem. Então o aspecto do seu módulo e de ser sempre o mesmo módulo, vai garantir agilidade, rapidez e economia financeira. Porque o treinamento é menor e a eficiência da mão de obra será maior depois de um certo tempo de treinamento. E assim, se você vai comprar qualquer coisa que é fabricada em larga escala, é uma coisa que é mais barata.

[...] E a construção civil é uma indústria, [...] é uma indústria de transformação. Então na construção civil quanto mais repetição tiver, mas eficiente os prazos e os custos de mão de obra.

Conclusão: Ambos especialistas afirmaram que a modularidade do produto impacta o processo de montagem da estrutura em timberframe. Os especialistas indentificaram diversos impactos positivos da modularidade na montagem do sistema, Pasello e Imai concordam que a modularidade está relacionada a redução do tempo de montagem garantindo maior agilidade e rapidez. Para Imai isso ocorre devido a repetição. Pasello ressalta que a modularidade também traz outros benefícios como a redução do risco de acidentes, menor desperdício de materiais e o aumento da precisão.

2- Qual a complexidade da montagem dos módulos? Pode ser facilmente montável?

Resposta Pasello: Todas as interfaces de ligação no plano dos quadros respeitam um padrão o que facilitou o processo de montagem. No entanto, as ligações entre quadros ainda possuem baixa padronização.

Em termos, as peças estruturais dos quadros são conectadas através de encaixes uniformes de pressão (barra roscada + porca + arruela). Reduzindo possíveis danos associados ao processo de montagem/desmontagem. No entanto, a ligação entre quadros ainda é parafusada e carece de padronização além de danificar a interface durante os processos de montagem/desmontagem.

Resposta Imai: [...] As suas peças de viga e de pilar são extremamente simples, por serem simples elas são eficientes, a simplicidade que garante a facilidade de montagem e da desmontagem.

Conclusão: Quanto a complexidade do módulo Imai classificou como extremamente simples, por isso eficiente, garantindo facilidade de montagem e desmontagem. Para Pasello, a padronização das interfaces facilitou o processo de montagem, entretanto, a ligação parafusada entre os quadros ainda pode causar danos e se desgastar durante esse processo.

3 - Qual a complexidade da desmontagem do módulo? Pode ser facilmente desmontável?

Resposta Imai: Então acho que a pergunta da montagem e desmontagem são a mesma coisa. Tanto para montar quanto para desmontar, pelo fato de você ter feito um desenho da peça simplificado, você consegue montar e desmontar muito rapidamente, então eu acho que o processo é eficiente nesses aspectos.

Resposta Pasello: Baixa complexidade, pois pode ser facilmente desmontado. Como a fixação dos módulos é predominantemente por pressão, basta desprender as porcas presentes nas interfaces de ligação para realizar o desacoplamento. Os blocos de fundação também podem ser desconectados com pouco dano à integridade do sistema estrutural. O único ponto de dificuldade são as ligações entre os quadros.

Conclusão: Quanto ao processo de desmonte ambos os autores concordaram que o módulo pode ser facilmente desmontado, a estrutura leva 47min e 49s para ser desmontada, isso indica como a estrutura pode ser facilmente desmontada em baixo período, além disso vale ressaltar que a estrutura pode ser desmontada utilizando apenas 1 parafusadeira e chaves de 19mm.

4 - A escala do módulo facilita no processo de montagem?

Resposta Pasello: Sim, apesar dos módulos terem em média três metros (grande dimensão se comparada à altura média de um ser humano), como as peças não são maciças (caixão perdido), é possível manuseá-las sem a necessidade de guinchos. Mesmo quando os módulos estruturais estão conectados nos quadros, ainda é possível levantar e posicionar apenas com a força humana.

Resposta Imai: o tamanho da tábua comercial é o parâmetro que você começou a fazer para montar a escala do seu módulo. Isso não apenas auxilia no tamanho do módulo, que é mais fácil de manusear, mas também auxilia no custo do módulo, porque no mercado você consegue encontrar peças comerciais que no geral, por serem produzidas em larga escala são mais baratas do que se você tentasse encontrar uma tábua de quatro metros de comprimento, que seria produzida sob encomenda.

Então, esse módulo me parece que é o módulo adequado, correto e possível nesse momento para você discutir a eficiência do tamanho das peças comerciais que você tem aqui. Em termos de eficiência de layout distributivo de ambiente, demanda de você fazer um estudo de layout. Então minha resposta para você é: a escala é adequada para uma eficiência produtiva, tanto em um aspecto econômico, quanto em um aspecto de facilidade de execução.

Conclusão: A utilização dos módulos em uma escala do subcomponente assim como previsto pelo Dfma facilitaram o processo de montagem. Segundo Imai, módulos de 325x25cm são mais fáceis de manusear, Pasello concorda e ressalta que módulos nessa escala podem ser manuseados sem a utilização de guinchos ou equipamentos semelhantes o que simplifica o processo.

5 - A redução do número de módulos do sistema facilita a logística de montagem e transporte? Se sim, de quais formas?

Resposta Pasello: Sim, quanto mais padronizados os módulos, mais fácil se torna o processo de transporte e montagem, já que a separação e agrupamento das peças depende dos tipos de módulos do sistema.

Resposta Imai: Sem dúvida a redução do número de peças auxilia muito. [...] O fato delas terem a dificuldade de serem marcadas pelo fato de que os furos não coincidem, a peça 1 não é igual a peça 2, apesar de teoricamente as duas serem a mesma peça, [...] todo esse processo, de corte, de ajuste, de aplainamento, de passar o desengrossador que vai fazer com que a sua peça tenha uma dimensão variada, ela é uma característica, digamos assim, do material que tem disponível, tá? Isso vai ter ajustes. Mas na hora que você faz um corte computadorizado, você zera tudo isso. Porque o que aconteceu: essa viga daqui, na hora que ela foi cortada, ela tinha a prancha e o caibro, mas aí tem esse dente. Esse dente aqui é por que? É porque talvez a prancha não tenha o mesmo tamanho, talvez o caibro esteja um pouco torto, tá certo? Mas nada impede você ao fazer o corte computadorizado, que você consiga ter as peças de maneira mais clara ali, ou tamanho adequado. [...]

Então esses ajustes que você tem que fazer entre uma peça e outra, quanto mais computadorizado você tiver o processo de produção em série. Porque a ideia é o seguinte: se você faz a produção em série e se você mecaniza essa produção em série, os limites que existem de dimensionamento, de furo e de tamanho, eles vão ser cada vez menores. O que você tem hoje aqui [...] é uma dificuldade do processo construtivo que nós temos que é muito artesanal.

Conclusão: Os especialistas concordam que a redução do número de peças facilitou a logística de montagem, a padronização das peças possibilita um entendimento facilitado de como o módulo funciona e como ele deve ser organizado.

Apesar dos módulos serem idênticos em teoria, foi necessário se marcar a posição de cada peça da montagem anterior para que todas as peças fossem encaixadas na mesma posição da montagem anterior, caso esse processo não fosse realizado teríamos problemas de encaixe entre os módulos, apesar de todos os encaixes terem sido feitos de forma idêntica. Imai ressalta que isso ocorre devido ao processo de produção ser muito artesanal. Isso mostra que quando falamos de modularidade precisamos ter uma alta precisão na produção das peças.

6- Quais adversidades específicas encontradas em relação ao material?

Resposta Pasello: A modularidade na indústria da construção civil possui características próprias. A variação climática pode alterar prazos. Apesar do tempo estável na semana da montagem, houve uma restrição com relação à produção de ruídos o que certamente reduziu a velocidade da construção.

A estratégia da modularidade exige um grau maior de precisão na indústria pois as interfaces devem ter o mesmo posicionamento de furos e encaixes. O material dos módulos também deve ser escolhido criteriosamente já que não pode deformar com o tempo.

:

Resposta Imai: O problema não é o material, o problema é o processo produtivo e a qualidade do material deve ser entendida como a disponibilidade que nós temos, inventando... estudando formas de criar um processo o mais preciso possível, em termos de dimensionamento, que seja por CNC, e de tal forma que você tenha que imaginar uma forma de ajustar isso daí na própria execução do processo.

Então, processos produtivos industrializados farão com que você consiga mais agilidade no procedimento e melhor diferença de tamanhos e de ajustes, e com isso você não vai precisar mais, teoricamente, anotar o número das peças. Teoricamente, tá? Mas se tiver que anotar o número das peças também, por que não? Se você observar, eu acho que tem uma casa montada aqui em baixo em que eles também anotam o número das peças, eles também montam a casa antes e quando chega aqui também é um quebra cabeça, por mais preciso que seja. De qualquer forma, essas imprecisões vão ser cada vez mais diminuídas quanto mais o processo produtivo for mecanizado e menos manual.

Conclusão: Quanto aos materiais e as adversidades encontradas, os especialistas ressaltam que o processo modular necessita de da utilização de equipamentos mais precisos. Imai ressalta que a utilização da madeira não é uma

adversidade encontrada no processo de industrialização, mas sim a utilização de processos muito artesanais que interferem na implementação da estratégia modular, pois os módulos necessitam de uma alta precisão para que possam abranger os conceitos de separabilidade e combinabilidade.

4.3.6 Discussão dos Resultados Montagem

4.3.6.1 Os impactos da modularidade do produto na montagem do sistema estrutural em Timberframe.

A modularidade do produto, como dita anteriormente, prevê os princípios da separabilidade e da combinabilidade, a aplicação dessa estratégia em estruturas em timberframe possui um impacto direto no processo de montagem, criando uma estrutura que pode ser montada e desmontada muito rapidamente sem danos aos seus elementos. O conceito da separabilidade foi testado durante esse trabalho no sistema ao se criarem módulos independentes que formam um todo e podem ser separados sem gerar dano as demais peças, houve também uma tentativa de testar os conceitos da combinabilidade ao se alterar a configuração dos encaixes gerando um módulo diferente, entretanto para que esse conceito seja totalmente testado seria necessária a remoção e aplicação de novos módulos na estrutura.

Entretanto, como constatado nos questionários, a modularidade aumenta a necessidade de uma maior precisão. Um alto rigor de precisão nas conexões é necessário para que todas as peças se encaixem perfeitamente, entretanto, devido ao processo artesanal de produção, houve problemas no momento de encaixar os módulos, foram necessários novos ajustes a cada remontagem. Outro problema da baixa precisão é o posicionamento dos módulos, no modelo, possui-se - em teoria - 16 módulos idênticos, os quais seriam intercambiáveis, porém ao se intercambiar dois módulos na posição da estrutura poderia se gerar problemas nos encaixes devido a desencontros dos furos de ligação, apesar dos furos terem sido feito da melhor forma possível e com uma mão de obra especializada, o método manual utilizado garante até certo nível de precisão às suas conexões. Esse fator pode tornar mais difícil a aplicação de conceitos da modularidade do produto em locais onde a mão de obra é mais artesanal e menos mecanizada, como no Brasil.

4.3.6.2 O impacto da escala dos módulos da estrutura no processo de montagem

De acordo com a banca de especialistas, o módulo estava numa escala aceitável, como ressaltado por Imai, quando se refere ao sistema estrutural, deve-se levar em conta que este guiará a modulação da edificação e afetará diretamente a disposição interna dos ambientes. Logo, deve-se equilibrar a fácil manuseabilidade com uma dimensão que permita uma boa disposição interna.


O tamanho do módulo da estrutura (325x25x8cm) em madeira com seção caixão perdido resultou em um módulo bastante leve (pesando aproximadamente 20 kg) e que pode ser transportado por duas pessoas, esses módulos geram uma área de piso de 14 m². Como ressaltado por Imai, são necessários mais estudos para descobrir os impactos dessa modulação na disposição dos ambientes, a banca ainda ressalta que talvez fossem necessários a utilização de submódulos.

A partir dos dados coletados, fez-se uma comparação do processo de manuseio de cada uma das possíveis escalas. Abre-se aqui um parêntese para ressaltar que o módulo, pela conceituação utilizada, seja de fato eficiente ele deve possuir a independência dos elementos internos excluída, pois isso apenas aumenta a complexidade do módulo (GERSHENSON *et al.* 2003). Em outras palavras o conceito de módulo aqui é de um elemento que não se divide mais em outros módulos. Por esse motivo para que os elementos a seguir fossem considerados módulos neste trabalho eles deveriam ser rígidos e indivisíveis.

A partir desses conceitos fez-se uma simulação dos recursos necessários para o manuseio caso o módulo fosse feito em diferentes escalas. A escala do módulo utilizada foi a do subcomponente (classificação por Gosling *et al.*, 2016) nessa escala pode-se carregar os módulos com apenas 2 pessoas e o peso de cada módulo é de apenas 20kg e possui a dimensão de 3,25x0,25x0,08 m (Quadro 11). Entretanto, se fossem utilizados módulos na escala do Componente teríamos peças de, aproximadamente 80kg com dimensões de 3,75x3,25x0,08 m, sendo necessárias 4 pessoas, em outras palavras teríamos um peso 4 vezes maior e seria necessário o dobro do esforço para seu manuseio. Caso se optasse por um módulo estrutural na escala do edifício (desconsiderando aqui assoalho e cobertura, apenas o esqueleto estrutural) ter-se-ia um módulo de 3,75x3,25x3,75 m, pesando, aproximadamente,

360, que apenas poderia ser levantado por guindastes aumentando muito a complexidade de montagem.

Quadro 11

Escala	Imagem da escala	Peso aproximado	Dimensões (m)	Manuseio
Escala do Subcomponente (Escala utilizada)		20kg	3,25x0,25x0,08	2 pessoas
Escala do Componente		80kg	3,75x3,25x0,08	4 pessoas
Escala do Elemento/Edifício		360kg	3,75x3,25x3,75	Guindaste

. Fonte: Autor, 2022.

5.0 Conclusões e sugestões para novos estudos.

Este trabalho buscou mostrar os impactos da modularidade do produto e do Dfma na fabricação e montagem em um sistema estrutural em timberframe produzido no Brasil. Quanto ao processo de fabricação, pode-se notar que a modularidade do produto e Design for Manufacturing (Dfma) teve um forte impacto, culminando em uma redução progressiva do tempo de fabricação dos módulos de um dia para outro e no mesmo dia. Os resultados também mostraram que a cada vez que o marceneiro/operário tem que reiniciar o processo, há um tempo de adequação, demorando mais para realizar o serviço, mostrando que pausas longas no processo produção dos módulos impactam a eficiência.

Deve-se notar que houve uma redução de 62% entre o tempo de fabricação do primeiro e do último módulos, isso só se deu devido ao fato dos módulos serem idênticos, o que parece indicar que um sistema estrutural modular com um número maior de módulos diferentes pode não apresentar esse ganho de eficiência, isso evidencia um dos conceitos utilizados pelo Dfma que é a redução do número de peças.

Quanto ao processo de montagem, as estratégias de montagem deram à estrutura pré-fabricada, uma montagem simplificada que pode ser realizada em 1h 28min e 5s, e pode ser desmontada ainda mais rapidamente, em apenas 47 min e 59s. A redução do número de peças provê uma estrutura com fácil logística, a redução da escala do módulo na escala do componente para a escala do subcomponente é fundamental para um manuseio mais facilitado sem a utilização de mais recursos, sendo, portanto, menos complexo.

Um ponto importante observado no processo de montagem é a relação da modularidade do produto com a industrialização, a modularidade exige um alto nível de precisão e padronização das conexões para seu melhor funcionamento, a utilização de processos artesanais pouco precisos pode ser um empecilho para a implementação dessa estratégia na construção civil. A utilização de métodos mais precisos e industrializados como o CNC, podem aumentar a precisão dos encaixes facilitando a implementação da modularidade do produto na construção civil.

Pode-se concluir que a aplicação dessas duas estratégias aumentaram a racionalidade do processo produtivo, a aplicação de módulos e a redução para apenas um módulo gera maior racionalidade no processo de fabricação com a redução

gradual no tempo de execução de cada peça, ou seja a repetição, a modularização e a simplificação aumentam a racionalidade da fabricação.

No processo de montagem, verificou-se que a modularidade do produto impacta diretamente o processo tornando possível a montagem e a desmontagem do módulo sem danos a estrutura, a existência de um único módulo facilita a logística e o reconhecimento da peça, tornando mais fácil esse processo para o marceneiro//operário. Todavia, deve-se ressaltar que para que seja possível a aplicação da modularidade do produto nesse sistema estrutural é necessário grande precisão no processo de fabricação das peças principalmente dos seus encaixes, o que pode ser um impedimento para a indústria de construção em massa. Percebeu-se também que existem outras características do módulo que impactam esse processo como a escala do módulo, quanto maior a escala do módulo, mais recursos são necessários para seu manuseio, ou seja, mais complexo será o processo de montagem. Desta forma conclui-se que: para que o processo de montagem do sistema estrutural se simplifique outros fatores, como a escala do módulo e o número de peças e os recursos necessários para o manuseio dos módulos, devem ser considerados. Em outras palavras a modularidade do produto impacta o processo de fabricação e montagem, porém existem outros fatores dentro da modularidade que impactam esses processos.

Como estudo científico, houve limitações que podem ser aprofundadas em estudos subsequentes. A primeira limitação encontrada foi a aplicação da combinabilidade no sistema, apesar de ser testada a combinabilidade através da mudança da configuração do produto, não foi possível testar a substituição de um módulo por outro módulo diferente e as consequências disso no sistema. Isso pode ter grandes desdobramentos no sistema estrutural. Por exemplo: ao se substituir o módulo de um pilar do sistema com uma altura X por outro módulo com altura Y talvez fosse necessário se substituir todos os módulos do pilar do sistema. Outras limitações estão relacionadas ao manuseio das peças, futuros trabalhos poderiam testar qual seria o tamanho ideal para que as peças possam ser facilmente manuseadas.

Observou-se neste estudo que quanto maior a escala do módulo mais recursos são necessários para o manuseio e transporte das peças. Assim, seriam necessários estudos feitos nessa linha para se estabelecer dimensões ideais para que o módulo

fosse facilmente manuseado e, ao mesmo tempo, gerasse uma boa configuração espacial. Dentro das configurações espaciais também poderia se discutir se seriam necessários submódulos para gerar espaços menores.

Outra questão importante são as ligações. A ligação proposta nesse trabalho apresentou alguns problemas devido à baixa precisão dos equipamentos utilizados. novos tipos de ligações entre os módulos que possibilitem a aplicação dos conceitos da modularidade do produto carecem de estudos.

Conclui-se que a modularidade do produto e o Dfma são estratégias capazes de trazer grandes e positivos impactos no processo de fabricação e montagem de sistemas construtivos, entretanto existem outros fatores que influem na racionalidade desses processos e ainda existem muitas dificuldades na implementação dessa estratégia na construção civil.

REFERÊNCIAS

A.D.J. Pinder, M.G. Boocock, **Prediction of the maximum acceptable weight of lift from the frequency of lift**, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Volume 44, 2, 2014, Pg. 225-237.

ARCHDAILY BRASIL. **Kokoon/ Aalto University Wood Program**. 2016. disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/801887/kokoon-aalto-university-wood-program> Acesso em: 28 maio 2021.

ARCHDAILY. **Liina Transitional Shelter / Aalto University Wood Program**. 2011. Disponível em: <https://www.archdaily.com/174909/liina-transitional-shelter-aalto-university-wood-program>. Acesso em: 11 maio 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5706. **Coordenação Modular da Construção**– Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1977.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120. **Cargas Para o Cálculo de Estruturas de Edificações** – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190. **Projeto de Estruturas de Madeira** – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1977.

BALDWIN C, CLARK K. **Managing in an Age of Modularity**. Harvard Business Review, sep. 1997. Disponível em: <https://hbr.org/1997/09/managing-in-an-age-of-modularity>. Acesso em: 03 maio 2020.

BANKS, C. *et al.* Enhancing high-rise residential construction through design for manufacture and assembly-A UK case study. Proc., Inst. Civ. Eng. Manage. **Procurement Law**, p. 164-175, 2018.

Bogue, R. (2012). Design for manufacture and assembly: background, capabilities and applications. *Assembly Automation*, 32(2), 112-118.

BOGUE, R. Design for manufacture and assembly: background, capabilities and applications. **Assembly Automation**, v. 32, n. 2, p. 112-118, 2012.

BRANSKI, R. Metodologia de Estudo de Casos Aplicada à Logística. Campinas: Unicamp, 2011.

CHEN, K.; LU, W.. Design for manufacture and assembly oriented design approach to a curtain wall system: A case study of a commercial building in Wuhan, China. **Sustainability**, v. 10, 2018.

DAMLA ACAR. Evolution and rationalization of timber frame design in Istanbul in the second half of the nineteenth century. **Journal of Architectural Conservation**, v. 23, n.3, p. 190-210, 2017.

DUBOIN, A.; HULTHÉN, K. Organizing logistics and transport activities in construction. **Emerald Insight**, v. 30, n.2, p. 620-640, 2018.

Emmatty, F. J., & Sarmah, S. P. (2012). Modular product development through platform-based design and DfMA. *Journal of Engineering Design*, 23(9), 696-714.

EPPINGER, S; SALMINEN, V. **Patterns of Product Development Interactions**. International Conference on Engineering Design, Glasgow, p. 9, ago, 2001.

FERREIRA, M. *et al.* **Coordenação Modular e Arquitetura: Tecnologia, Inovação e Sustentabilidade**. NUTAU, 2008.

FINE, C. **Three-Dimensional Concurrent Engineering**: Clockspeed-based Principles for Product, Process, and Supply Chain Development Winning industry control in the age of temporary advantage, 1998. Disponível em: <https://studylib.net/doc/10882776/three-dimensional-concurrent-engineering--clockspeed-base>. Acesso em: 14 out 2020.

GBADAMOSI, A. *et al.* Offsite construction: Developing a BIM-based optimizer for assembly. **J. Cleaner Prod**, p. 1180-1190, 2019.

GERSHENSON J. *et al.* Product modularity: definitions and benefits. **Journal of Engineering Design**, Cambridge, v. 14, n. 3, p. 295-313, sept, 2003.

GOSLING, J. *et al.* Defining and Categorizing Modules in Building Projects: An International Perspective. **Journal of Construction Engineering and Management**, Estados Unidos da América, v. 142, maio, 2016.

HUDERT, M.; PFEIFFER, S. **Rethinking Wood**: Future Dimensions of Timber Assembly. Basileia: Birkhäuser, 2019.

HUGHES, M. Cascading Wood, Material Cycles and Sustainability. In: **Rethinking Wood: Future Dimensions of Timber Assembly**. Birkhäuser, 2019. p. 31-46.

IMPERIALE, A. 2012. **An American Wartime Dream: The Packaged House System**. *ACSA Fall Conference*, p. 39-42. Stanford: Temple University, 2012.

KIM, M. *et al.* A suitability analysis of precast components for standardized bridge construction in the United Kingdom, **Procedia Eng**, 164, p.188-195, 2016.

KUDSK, A. *et al.* Modularization in the Construction Industry Using a Top-Down Approach. **The Open Construction and Building Technology Journal**, Abu Dhabi, v. 7, p. 88-98, july, 2013a.

KUDSK, A. *et al.* Stepwise Modularization in the Construction Industry Using a Bottom-Up Approach. **The Open Construction and Building Technology Journal**, Abu Dhabi, v. 7, p. 99-107, sep, 2013b.

MOURA, J. D. M. ; BARNABÉ, Marcos Fagundes ; ZWIEJSKI, Jan Bartelemey ; SILVA, Ricardo Dias . **habitação de emergência em madeira**. 2004. (protótipo).

MOURA, J. D. M.; BARNABÉ, Marcos Fagundes ; SILVA, Ricardo Dias . I **Seminário internacional sobre habitação econômica**; I Workshop sobre habitação econômica- habitação de emergência. 1. ed. londrina: universidade estadual de londrina, 2005. v. 1. 98 p.

MOURA, J. D. M.; SILVA, Ricardo Dias ; cardoso, a.p. . **Projetos de Habitação Mínima em madeira** - moradia econômica. 1. ed. londrina: eduel, 2009. v. 1. 86 p.

NOGUEIRA, Marcelo; Classificação de Peças de Madeira Serrada de Dimensões Estruturais de Eucalyptus Sp. com Uso de Ensaio Não-Destrutivos. 2007. 120 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

OLUGBENGA, A. *et al.* Design for deconstruction using a circular economy approach: barriers and strategies for improvement. **Production Planning & Control**, Londres, v.31, n.10, p. 829-840, nov. 2019.

PAIXÃO, Amanda. **Painel Estrutural com Fechamento de Tábuas de Madeira de *Pinus spp.*** 2018, Dissertação -Universidade Estadual de Londrina

ROCHA, C. *et al.* **A model for implementing product modularity in buildings design. Engineering**, Construction and Architectural Management, Reino Unido, v. 27, p. 680 -699, ago. 2019.

ROCHA, C. *et al.* Adopting Product Modularity in House Building to Support Mass Customisation. **MDPI AG**, Basel, v. 7, p. 4919-4937, apr, 2015.

SAFAA, Y. P.; J. U. D. HATMOKO; PURWANGGONO, B.. Evaluation of the use of prefabricated bridge elements with design for manufacture and assembly (DfMA) criteria. In **Proc., MATEC Web of Conf.** Les Ulis, France: EDP Sciences, 2019

SAKO, M.; MURRAY, F. **Modules in Design, Production and Use.** Universidade de Oxford, Oxford, p. 1-35, 2000.

SALVADOR, F. Toward a Product System Modularity Construct. **IEEE Transactions on Engineering Management**, Madri, v. 54, n. 2, p. 219-240, 2007.

SHAFFIE, S. *et al.* Modularisation strategies in the AEC industry: a comparative analysis. **Architectural engineering and design management.** Reino Unido, v. 16, p. 1-23, 2020.

SHAMSUZZOHA, A., Modular Product Architecture to Manage Supply Chain Complexity. **International Journal of Supply Chain Management**, v.7, 2018.

SHAMSUZZOHA, A.; KYLLÖNEN, S; HELO, P. Collaborative customized product development framework, **Industrial Management & Data Systems**, v.109, n. 5, p. 718- 735, 2009.

Stoll, H. W. (1986). "Design for manufacture: An overview." *Appl Mech Rev*, 39(9), 1356.

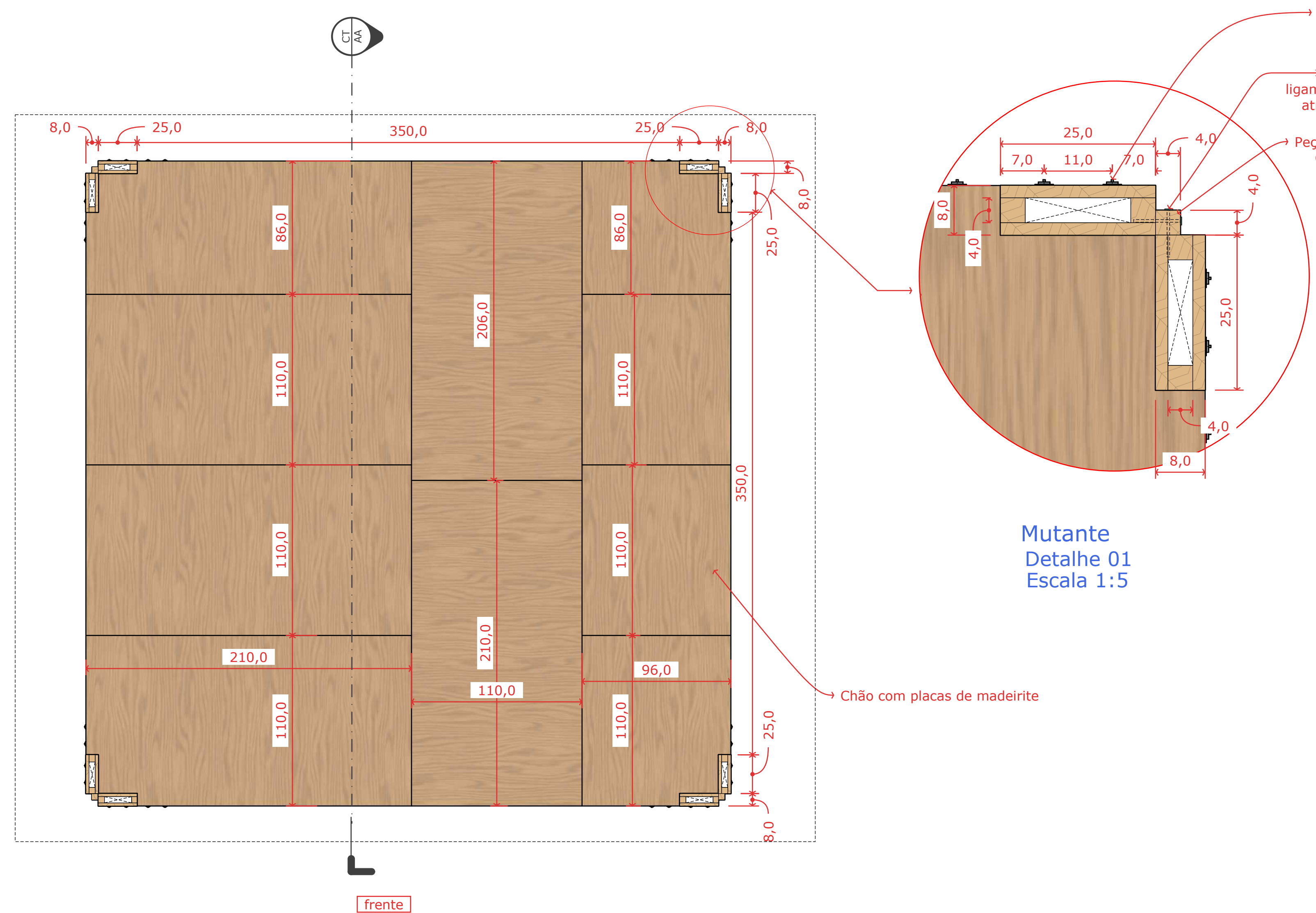
Swift, K. G, & Brown, N. J. (2013). Implementation strategies for design for manufacture methodologies, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 217(6), 827–833.

TAN TAN *et al.* Construction-Oriented Design for Manufacture and Assembly Guidelines. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 146, n. 8, 2020.

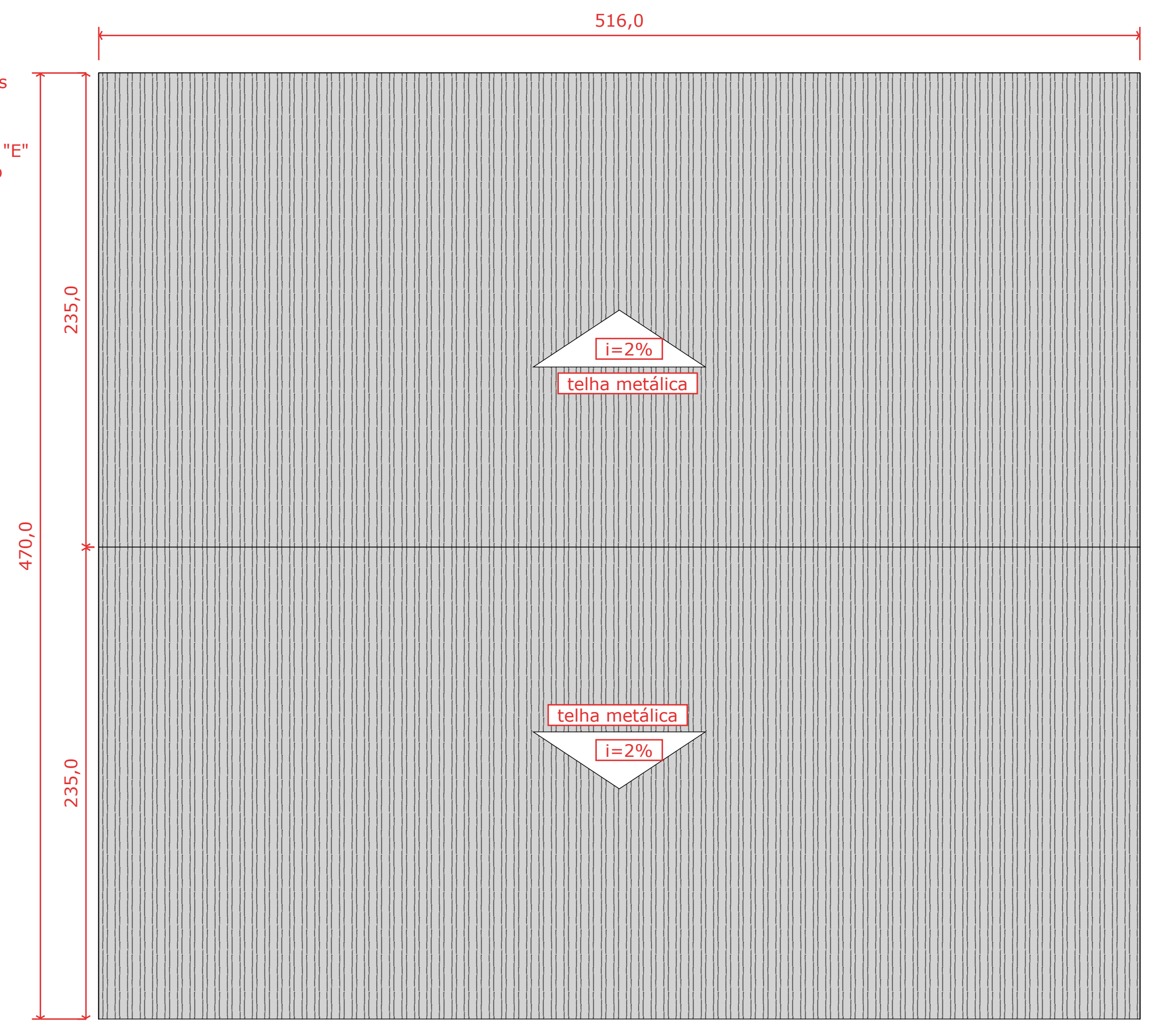
ULRICH, K. **The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm.** Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, p.22, out, 1992.

VOORDIJK, H. *et al.* Modularity in supply chains: A multiple case study in the construction industry. **Int. J. Oper. Prod. Manag.** p. 600-618, 2006.

WU, C.; HAMADA, M. **Experiments**: Planning, Analysis, and Optimization, 2nd Edition. Atlanta: Wiley, 2009.

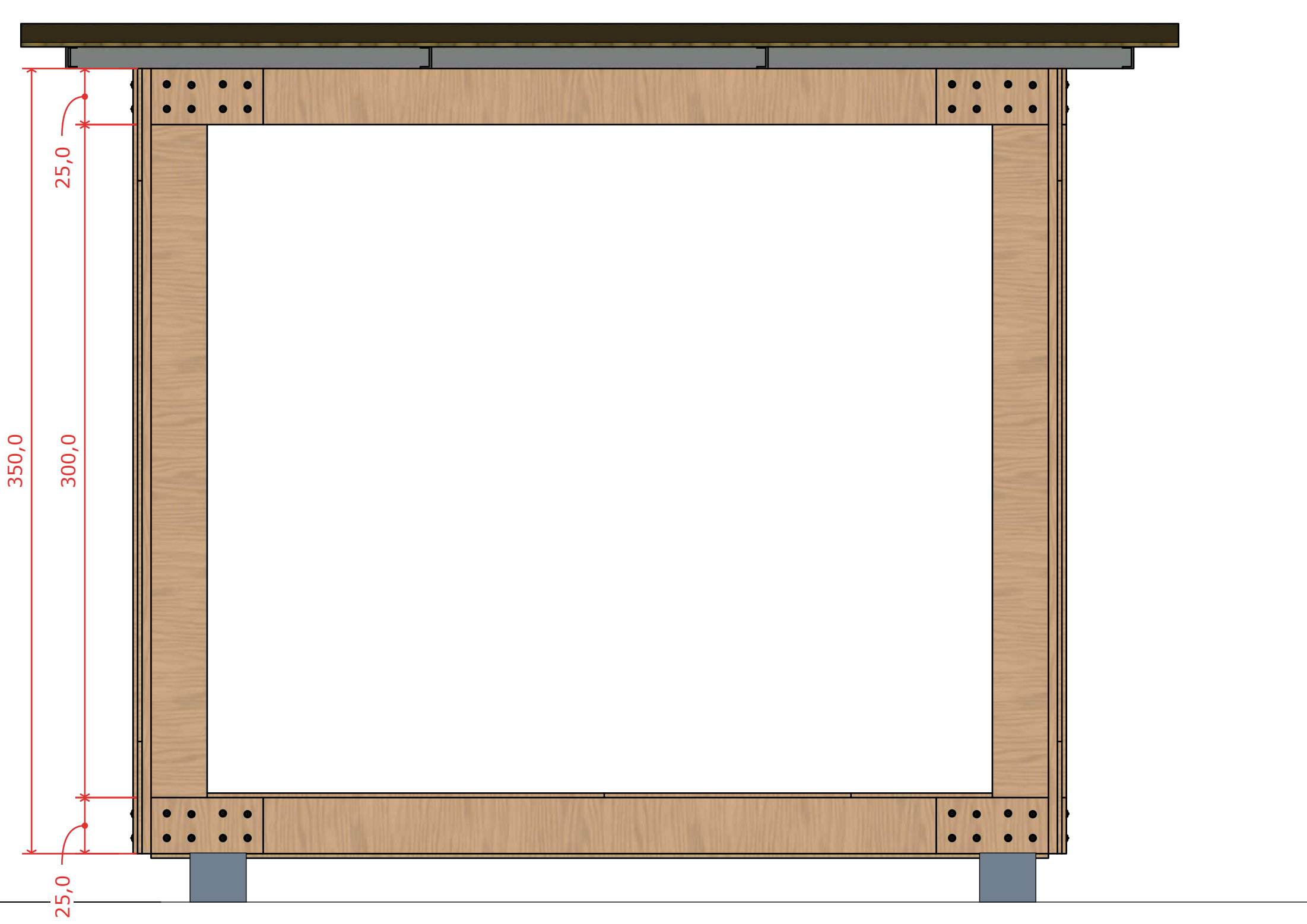


Mutante Detalhe 01 Escala 1:5

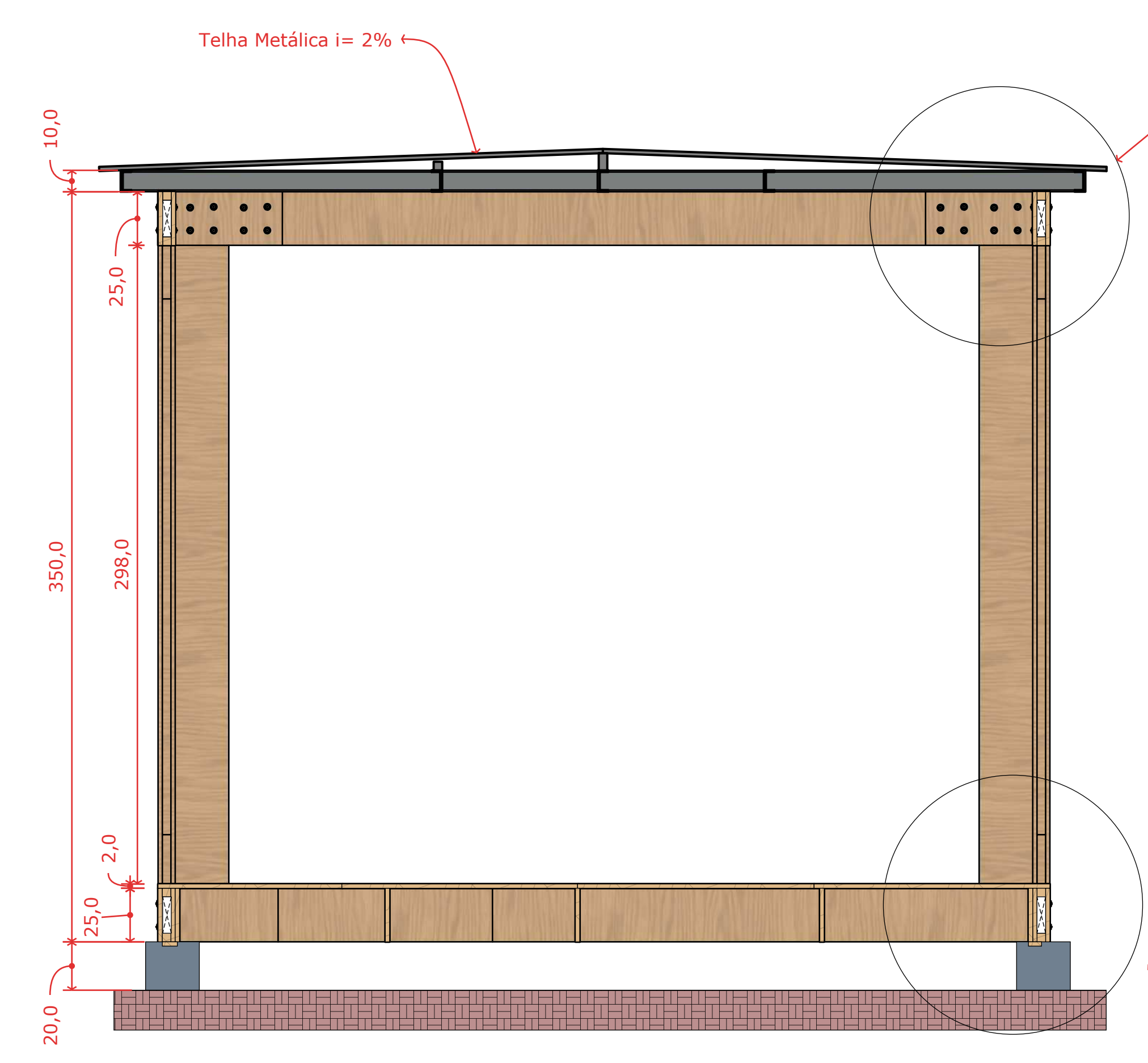


Mutante Cobertura Escala 1:20

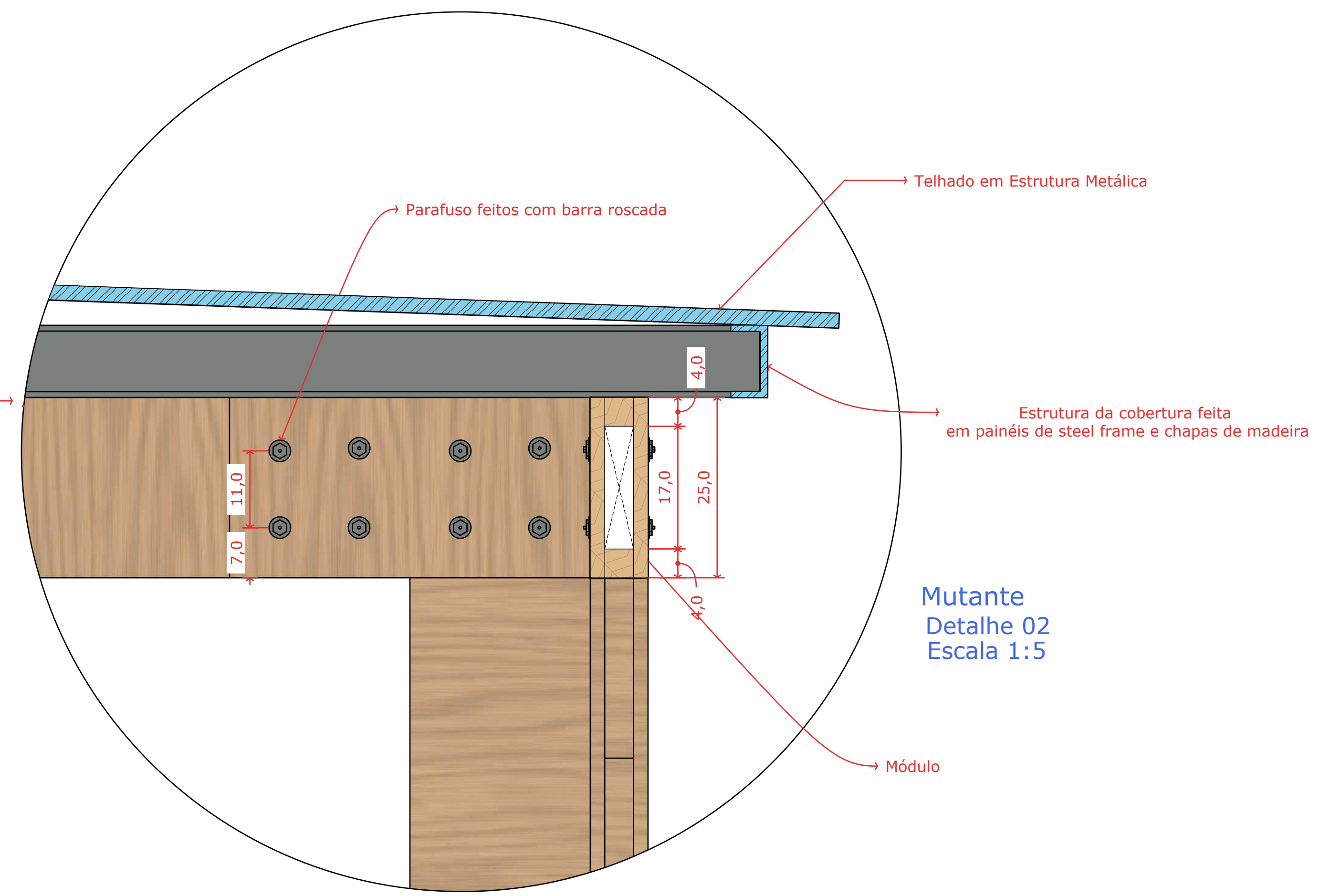
Mutante Planta Baixa Escala 1:20



Mutante Vista Frontal Escala 1:20



Mutante Corte AA Escala 1:20



Mutante Detalhe 02 Escala 1:5

