



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE  
ESTRUTURAS DE PISO DE MADEIRA COM VIGAS  
EM PERFIS I NO SISTEMA WOOD FRAME**

ÍTALO FAUSTINO SOUZA

UBERLÂNDIA/MG

2023

ÍTALO FAUSTINO SOUZA

**PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE  
ESTRUTURAS DE PISO DE MADEIRA COM VIGAS  
EM PERFIS I NO SISTEMA WOOD FRAME**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil (FECIV), da Universidade Federal de Uberlândia como requisito exigido para a conclusão do curso de Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof. Dr. Jesiel Cunha

UBERLÂNDIA/MG

2023

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, a Deus, que permitiu que eu tivesse saúde e determinação para ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da vida acadêmica.

Aos meus familiares, especialmente à minha mãe, que sempre procurou em me proporcionar as melhores oportunidades de estudo, crescimento e desenvolvimento, me apoiando e me incentivando nos caminhos em que escolhi trilhar.

Aos meus professores, que contribuíram para a base da minha formação profissional, compartilhando suas experiências e conhecimento.

Aos meus amigos, que sempre estão ao meu lado torcendo pelo meu sucesso pessoal e profissional, além de terem tornado essa trajetória mais leve e divertida.

## RESUMO

Neste trabalho é apresentado a *I-Joist* que é uma madeira engenheirada, mais especificadamente, uma viga em madeira em perfil “I”, utilizada em estrutura de piso ou cobertura, que proporciona algumas vantagens quando comparado com outros perfis em madeira. É de conhecimento geral, que a madeira não é vastamente utilizada no ramo da construção civil no Brasil, isso deve-se à vários fatores, principalmente cultural, pois a madeira mesmo atualmente ainda é relacionada à fragilidade e conceitos errôneos. Sendo assim, o objetivo geral desse trabalho é contribuir com o estudo da madeira na construção civil nacional. Em outros países como Estados Unidos, Canadá e Suécia, a madeira já ganhou seu devido protagonismo, e isso acarretou inovações no ramo da construção civil, com por exemplo, o surgimento das madeiras engenheiradas, que são madeiras processadas industrialmente a fim de otimizar o seu desempenho para uso na construção civil. A madeira engenheirada ganhou bastante notoriedade devido seus benefícios, por isso o objetivo em específico desse trabalho foi apresentar o perfil “I” em madeira, destacando as vantagens de utilizar tal perfil quando comparado com o perfil retangular em madeira. Para isso, foi desenvolvido o projeto de um sobrado residencial com estrutura em *Wood Frame* e, posteriormente, realizado o dimensionamento da estrutura de piso composta por *I-Joists*. O dimensionamento do perfil em “I” destacou a principal vantagem dele, que é o fato de ser um perfil otimizado, capaz de vencer grandes vãos e resistir elevadas cargas, mesmo sendo um perfil compacto e leve.

**Palavras chaves:** *I-Joist*, madeira engenheirada, dimensionamento, *Wood Frame*.

## ABSTRACT

In this work, I-Joist is presented, which is an engineered wood, more specifically, a wooden beam in an “I” profile, used in floor or roof structures, which provides some advantages when compared to other wooden profiles. It is common knowledge that wood is not widely used in the construction industry in Brazil, this is due to several factors, mainly cultural, as wood even today is still related to fragility and erroneous concepts. Therefore, the general objective of this work is to contribute to the study of wood in national civil construction. In other countries such as the United States, Canada and Sweden, wood has already gained its due protagonism, and this has led to innovations in the civil construction sector, with, for example, the emergence of engineered wood, which is wood processed industrially in order to optimize its performance for use in construction. Engineered wood has gained a lot of notoriety due to its benefits, so the specific objective of this work was to present the “I” profile in wood, highlighting the advantages of using such a profile when compared to the rectangular wood profile. To this end, a project for a residential townhouse with a Wood Frame structure was developed and, subsequently, the floor structure composed of I-Joists was designed. The sizing of the “I” profile highlighted its main advantage, which is the fact that it is an optimized profile, capable of covering large gaps and resisting high loads, even though it is a compact and light profile.

**Keywords:** I-Joist, engineered wood, sizing, Wood Frame.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Primeiro edifício construído com madeira engenheirada no Brasil.....	14
Figura 02: Produtos engenheirados de madeira.....	15
Figura 03: Madeira Laminada colada (MLC).....	15
Figura 04: Shopping Iguatemi de Fortaleza.....	16
Figura 05: Processo de fabricação da madeira laminada colada e cruzada.....	17
Figura 06: Princípio básico de colagem das placas.....	18
Figura 07: Seções transversais típicas, seção I, bem como seções retangulares ocas (seção caixão).....	18
Figura 08: Exemplo de vigas “I” com três tipos de materiais nas mesas.....	20
Figura 09: Processo de fabricação das I-Joist.....	21
Figura 10: Tipos de geometrias alma/mesa.....	22
Figura 11: Comparação entre a estrutura Wood Frame atual e a utilizada até 1900.....	23
Figura 12: Prédio em Wood Frame em Araucária/PR.....	24
Figura 13: Parede estrutural em Wood Frame.....	25
Figura 14: Representação da vedação e revestimento de uma parede em Wood Frame.....	25
Figura 15: Estruturação de uma edificação em Wood Frame.....	26
Figura 16: Vista da estrutura de piso com I-Joist.....	26
Figura 17: Vista superior da estrutura de piso com I-Joist.....	27
Figura 18: Vista da estrutura de piso.....	27
Figura 19: Vista da estrutura Wood Frame com I-Joist.....	27
Figura 20: Plantas arquitetônicas.....	29
Figura 21: Fachada frontal do imóvel.....	29
Figura 22: Estrutura Wood Frame – Térreo (vista frontal).....	30
Figura 23: Estrutura Wood Frame – Térreo (vista lateral).....	31
Figura 24: Estrutura Wood Frame – 2º Pavimento (vista lateral).....	31
Figura 25: Estrutura Wood Frame – 2º Pavimento (vista frontal).....	32
Figura 26: Estrutura da cobertura (vista frontal).....	32
Figura 27: Estrutura da cobertura (vista lateral).....	32
Figura 28: Estrutura de piso.....	33
Figura 29: Locação das vigas I-Joists.....	34
Figura 30: Vista da estrutura da edificação (vista frontal).....	34
Figura 31: Vista da estrutura da edificação (vista lateral).....	35

Figura 32: Vista da estrutura da edificação (vista posterior).....	35
Figura 33: - Principais modos de falhas das vigas “I”.....	36
Figura 34: Vista longitudinal da viga que será dimensionada.....	38
Figura 35: Área de influência da viga selecionada.....	39
Figura 36: Perfil JJI 300 B+.....	39
Figura 37: Projeto arquitetônico destacando as paredes não estruturais.....	41
Figura 38: Carregamento da viga.....	42
Figura 39: Seção Fictícia.....	49
Figura 40: Tensões do momento fletor.....	50
Figura 41: Perfil JJI 300 C.....	51
Figura 42: Ponto crítico entre o ligamento mesa-alma.....	55
Figura 43: Tubulação passando pela alma da viga.....	66
Figura 44: Tubulação passando pela alma da viga.....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Vãos permitidos por APA EWS Performance Rated I-Joists – Vão simples (bi-apoiada).....	38
Tabela 02: Propriedades das JJI-Joists.....	40
Tabela 03: Carga uniformemente distribuído.....	42
Tabela 04: Propriedades da madeira maciça.....	43
Tabela 05: Propriedades da placa OSB.....	44
Tabela 06: Valores de $K_{mod}$ .....	45
Tabela 07: Valores de $K_{def}$ .....	46
Tabela 08: Coeficientes de ponderação ( $\gamma_w$ ).....	46
Tabela 09: Carga uniformemente distribuído.....	52
Tabela 10: Resultado do dimensionamento.....	59
Tabela 11: Carregamento sobre a viga.....	60
Tabela 12: Peso aproximado da estrutura de piso.....	65
Tabela 13: Peso aproximado da estrutura do piso – Vigas retangulares.....	65

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Objetivos gerais.....	11
1.2 Objetivo específico.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 A madeira na construção civil.....	12
2.2 Produtos engenheirados de madeira.....	13
2.2.1 Madeira laminada colada.....	15
2.2.2 Madeira laminada cruzada.....	17
2.3 Vigas em “I”.....	18
2.3.1 Aspectos históricos.....	19
2.3.2 Materiais constituintes.....	19
2.3.3 Fabricação das <i>I-Joists</i> .....	21
2.3.4 Normatização.....	22
2.4 <i>Wood Frame</i> .....	23
2.4.1 Elementos constituintes.....	24
2.4.2 Vantagens do <i>Wood Frame</i> .....	28
3 ESTUDO DE CASO.....	28
3.1 Definição do projeto arquitetônico.....	29
3.2 Concepção do projeto estrutural.....	30
3.3 Dimensionamento da estrutura de piso com I-Joist.....	36
3.3.1 Determinação do carregamento.....	37
3.3.2 Propriedades físicas da JJI 300B <sup>+</sup> .....	43
3.3.3 Valores de projeto das propriedade dos materiais.....	44
3.3.4 Combinação de carregamento.....	48
3.3.5 Secção fictícia.....	48
3.3.6 Resistência à flexão.....	50
3.3.7 Verificação da resistência à força de cisalhamento.....	53
3.3.8 Resistência ao cisalhamento das conexão alma-mesa.....	54
3.3.9 Verificação da flecha.....	56
3.3.10 Resultado do dimensionamento da estrutura de piso com I-Joist.....	59
3.4 Dimensionamento da estrutura de piso com seção retangular.....	60
3.4.1 Determinação do carregamento.....	60

3.4.2 Propriedades mecânicas da viga.....	60
3.4.3 Valores de projeto das propriedades do material.....	61
3.4.4 Combinação de carregamento.....	62
3.4.5 Verificação das resistências.....	62
4 COMPARAÇÃO ENTRE A SEÇÃO “I” E A SEÇÃO RETANGULAR.....	64
4.1 Orçamento.....	64
4.2 Peso da estrutura de piso.....	65
4.3 Passagem da tubulação.....	66
5 CONCLUSÃO .....	67
REFERÊNCIAS.....	69

## 1 INTRODUÇÃO

A madeira desde os tempos primórdios é utilizada de diversas formas para benefícios humanos. Desde a utilização como lenha para fogueira, móveis decorativos ao uso estrutural em edificações e coberturas. No Brasil, a madeira é bastante utilizada em coberturas, contudo não foi desenvolvido o hábito de utilizar a madeira como material estrutural de forma mais ampla, como ocorre em outros países.

Em alguns países o uso da madeira é bem recorrente na construção civil, como por exemplo no Estados Unidos e Canadá, onde esse importante componente já assumiu seu protagonismo na construção civil, sendo empregado não só como material de apoio ou acabamento, mas sim como material estrutural. Com isso, novos aprimoramentos do material foram desenvolvidos, como por exemplo as vigas “I” em madeira, que surgiram como alternativa para melhorar o desempenho e a eficiência das estruturas em madeira. Estes elementos fazem parte das chamadas “madeiras engenheiradas”, que são materiais modernos de madeira, com boas características estruturais, sendo inclusive mais sustentáveis.

Os perfis “I” em madeira, também conhecida como “*I-Joists*” são elementos estruturais feitos com mesas superior e inferior geralmente de madeira serrada ou madeira laminada colada e alma de chapas de Oriented Strand Board (OSB). O formato “I” permite o uso mais eficiente da madeira, por serem elementos estruturais de baixo peso estrutural e alta rigidez e resistência mecânica.

### 1.1 Objetivo geral

A madeira é amplamente utilizada no exterior para fins estruturais, diferente do que ocorre no Brasil atualmente. Em decorrência disso, não obtivemos inovações significativas na forma de aplicar a madeira no ramo da construção civil de forma mais eficiente. Um dos fatores que influencia na baixa utilização da madeira é a falta de pesquisas nessa área, por isso o objetivo desse trabalho é contribuir com o estudo da utilização da madeira na construção civil no Brasil.

## **1.2 Objetivo específico**

Em específico apresentando o perfil “T”, que é um perfil aprimorado, que apresenta benefícios consideráveis, além de ser um perfil otimizado e que pode facilmente ser incorporado às construções nacionais. Para isso, no decorrer do trabalho, é apresentar um estudo geral do perfil “T” em madeira e posteriormente realizar o projeto e o dimensionamento de tal perfil aplicado a pisos de edificações, comparando-o ao perfil retangular tradicional.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 A madeira na construção civil**

A madeira é um dos materiais naturais mais antigos da humanidade, por isso, desde os tempos primórdios vêm sendo utilizada para diversas finalidades, desde a utilização mais simples, como fonte de energia, até uso mais complexos, como por exemplo, o uso da madeira como elemento estrutural na construção civil.

Segundo Cechella (2010), no Brasil, a madeira é utilizada com frequência, para múltiplas finalidades. Na construção civil, destaca-se especialmente nas coberturas, cimbramentos, transposição de obstáculos, armazenamento e material de apoio em canteiros de obras. Além disso, esse material é muito empregado na fabricação de componentes para a edificação, como painéis divisórios, portas, caixilhos, lambris, forros etc.

Gradativamente a utilização da madeira vem crescendo no ramo da construção civil no Brasil, por conta das suas características únicas, por ser um material renovável e de grande abundância no país. De acordo com Camargos (2019), atualmente a principal utilização da madeira nacionalmente, na construção civil, são em coberturas, devido a sua eficiência em vencer grandes vãos com o emprego de peças mais leves, se comparadas com outras configurações de elementos estruturais para a mesma função.

A madeira possui algumas vantagens, quando comparado com outros materiais estruturais, como por exemplo: capacidade de resistir tanto a esforços de compressão como de tração, baixa massa volumétrica e resistência mecânica elevada, excelente isolante térmico, boa capacidade de absorção de ruídos, alta durabilidade, além de ser uma matéria-prima renovável e de baixo

consumo de energia. Por conta dessas vantagens, a madeira vem ganhando notoriedade nacional e está cada vez mais ampliando sua utilização na construção, assim como já ocorre em outros países da Europa e da América do Norte.

Com a evolução cotidiana, inevitavelmente surge a criação de novos materiais e métodos construtivos, possibilitando com isso chegar a locais que antes não eram possíveis, além das soluções para diferentes necessidades. Um exemplo é a madeira engenheirada, que é um tipo de madeira processada industrialmente a fim de otimizar o seu desempenho na construção civil.

## **2.2 Produtos engenheirados de madeira**

Embora o uso da madeira esteja se disseminando no Brasil apenas agora, em outros países esse material já ganhou o seu protagonismo na construção civil, acarretando avanços nos estudos e nas inovações do produto. De acordo com Artesano (2023), uma das inovações que esses estudos na madeira ocasionaram foi o surgimento das madeiras engenheiradas na Áustria, como uma solução para madeiras que seriam descartadas. O método construtivo deu tão certo que ganhou espaço no país, e já é amplamente utilizado nos Estados Unidos, Europa e Ásia.

Conforme definido por Ghisleni (2023) a madeira engenheirada é a madeira que é processada industrialmente a fim de otimizar o seu desempenho para uso na construção civil. Geralmente, são madeiras que passam por um processo de seleção que exclui nós, trincas e rachaduras para, então, alinhar as fibras e transformar as madeiras em tábuas, lâminas ou até mesmo micropartículas de modo que facilite a união das peças.

Os produtos engenheirados de madeira vem cada vez mais ganhando conhecimento nacional. Atualmente, tais produtos já estão sendo utilizados no ramo da construção nacional, principalmente para projetos de coberturas mais elaborados e sofisticados. De acordo com Madeira Total (2020), em meados de 2020 foi construído o primeiro edifício multipisos utilizando madeira engenheirada no Brasil (figura 01).

Figura 01: Primeiro edifício construído com madeira engenheirada no Brasil



Fonte: Madeira total (2020)

O primeiro edifício multipisos no Brasil, apresentado na figura 01, situa-se em São Paulo/SP e possui área construída de 1.499,38 m<sup>2</sup> distribuídos em quatro pavimentos. No projeto foi utilizado CLT (*Cross Laminated Timber*), madeira laminada cruzada, e MLC (*Glued Laminated Timber*), madeira laminada colada, que é um sistema composto por placas que formam as paredes e lajes no lugar das vigas e pilares convencionais.

De acordo com o Sebrae (2023), a vantagem mais notória da madeira engenheirada é que ela se torna mais resistente do que a madeira tradicional, não apenas pela sua composição, mas também pelo controle técnico que é realizado nas fábricas no momento de produção desses materiais. Além disso, o material se destaca também pela eficiência, versatilidade, facilidade de manuseio e a sustentabilidade que esse material proporciona quando comparado com o concreto e o aço.

A Associação da Madeira Engenheirada (2007), *Engineered Wood Association* – (APA), divide os produtos engenheirados de madeira em seis categorias gerais: 1º os painéis estruturais, incluindo o (OSB) – *Oriented Strand Board*, o compensado (*plywood*) e painéis compósitos (*Waferboard*); 2º a madeira laminada colada (*glulam*); 3ª madeira serrada composta estrutural (SCL), incluindo principalmente folheado de madeira laminada (LVL); 4º as vigas em “I” de madeira. A figura 2 apresenta os tipos de produtos engenheirados de madeira.

Figura 02: Produtos engenheirados de madeira



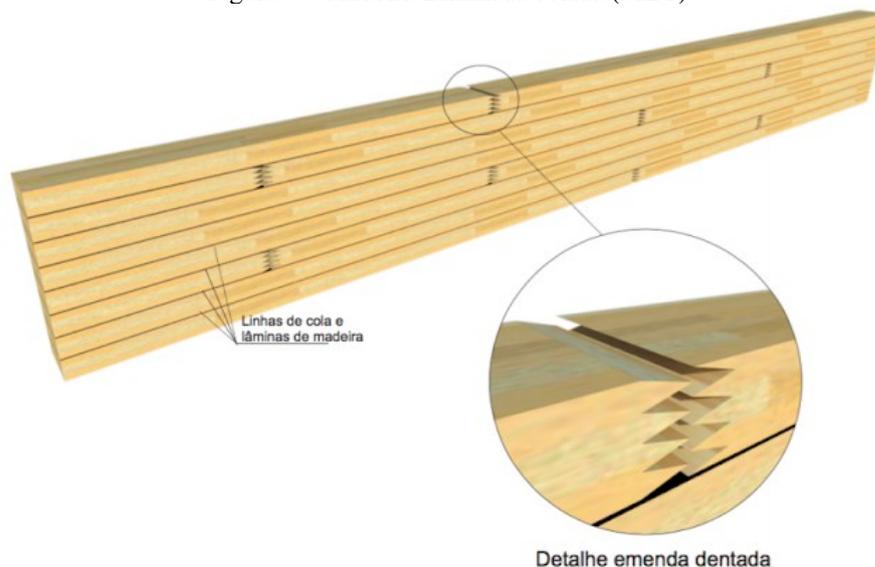
Fonte: *Engineered Wood Association* (2010)

Dentre os produtos apresentados na figura acima, pode-se destacar a madeira laminada colada e a madeira laminada cruzada.

### 2.2.1 Madeira laminada colada

Migliani (2019) define a madeira laminada colada (MLC) como um material estrutural fabricado através da união de segmentos individuais da madeira, colados com adesivos industriais. Na figura 03 é apresentado um exemplo de MLC.

Figura 03: Madeira Laminada colada (MLC)



Fonte: Migliani (2019).

O processo de fabricação da MLC, consiste em três etapas, conforme descrito por Carpintaria Inteligente (2016), sendo:

- 1ª Etapa: consiste na checagem das dimensões, umidade e resistência. Assim que a madeira chega na fábrica é realizado uma checagem das dimensões das peças e aquelas que não atingirem as dimensões mínimas do elemento estrutural a ser fabricado, são descartadas. Após a primeira triagem, é verificado a umidade de cada madeira. Logo após, é verificado a classe de resistência de cada peça, possibilitando a escolha daquelas que mais se enquadram no tipo de aplicação, e por fim, as tábuas estão prontas para serem transformadas.
- 2ª Etapa: é realizado a emenda entre as peças, que precisa ser resistente e precisa, garantindo a qualidade final do produto. Com a emenda realizada, as placas são encaminhadas para a prensa hidráulica, onde são prensadas e posteriormente armazenadas.
- 3ª Etapa: na última fase, é feita a colagem das placas com adesivo e encaminhadas para a verificação dos gabaritos e remoção de quaisquer irregularidades das superfícies. E para finalizar o processo, é realizado o acabamento e tratamento das superfícies do produto.

Conforme destacado por Carpintaria Inteligente (2018), a madeira laminada colada (MLC), tem uma alta capacidade de carga e um baixo peso próprio, o que permite a elaboração de produtos de pequenas dimensões e grandes envergaduras, além de ser um material resistente a substâncias químicas e agressivas e quando comparado com madeira maciça, as MLC exigem um número bem menor de ligações, uma vez que são previstas para grandes dimensões. A figura 04, apresenta a praça de alimentação do Shopping Iguatemi de Fortaleza, onde foi projetado um pergolado de madeira todo em madeira laminada colada.

Figura 04: Shopping Iguatemi de Fortaleza



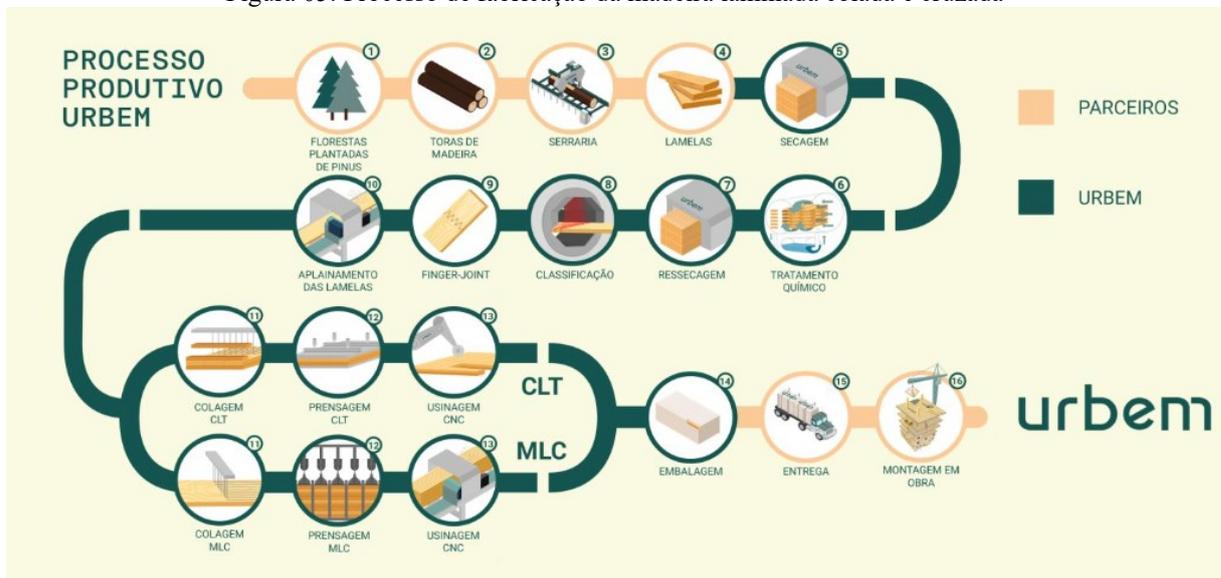
Fonte: Carpintaria Madeira Inteligente (2016)

### 2.2.2 Madeira laminada cruzada

Como Souza (2018) definiu, a madeira laminada cruzada, conhecida como *Cross-laminated timber* (CLT), é composto por tábuas (ou lamelas) de madeira serradas, coladas e prensadas em camadas, onde cada camada de lamela orienta-se perpendicularmente à anterior. Ao unir camadas de madeira em ângulos perpendiculares, obtém-se uma maior rigidez estrutural para o painel em ambas as direções. Dessa forma, o painel apresenta boa resistência para tração e compressão.

Na figura 05, é esquematizado o processo de fabricação da madeira laminada cruzada, o qual é bem semelhante ao processo de fabricação da madeira laminada colada. Na etapa de colagem das camadas de lamelas é onde ocorre a diferença, visto que na madeira laminada colada, o processo produtivo é realizado por meio de colagem de lamelas de madeira com o sentido das fibras paralelo ao eixo longitudinal do produto e a madeira laminada cruzada as lamelas são posicionadas perpendicularmente entre si (figura 06).

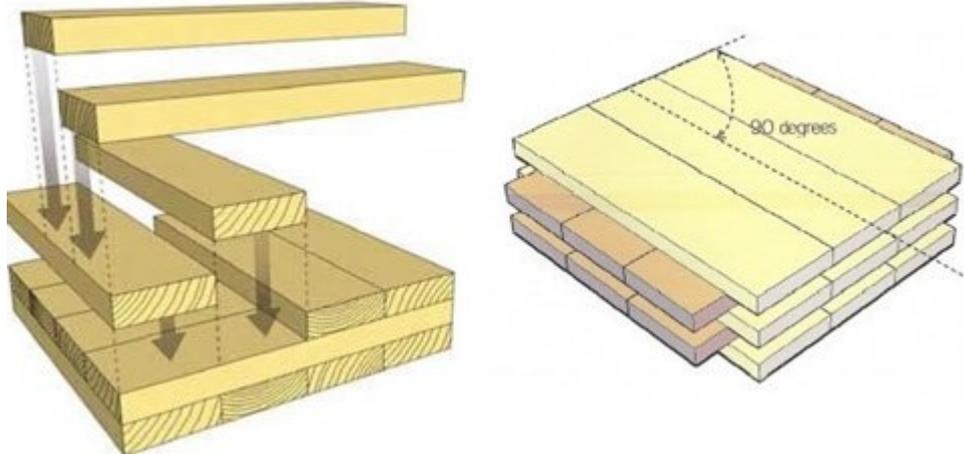
Figura 05: Processo de fabricação da madeira laminada colada e cruzada



Fonte: Urbem (2020)

A seguir é apresentada a forma de posicionamento das camadas na madeira laminada cruzada, possibilitando a visualização da diferença entre a madeira laminada colada e a madeira cruzada.

Figura 06: Princípio básico de colagem das placas

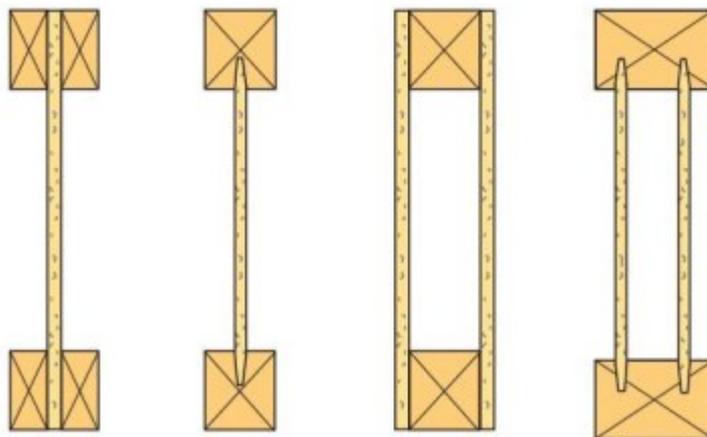


Fonte: Carpintaria Madeira Inteligente (2018).

### 2.3 Vigas em “I”

As vigas “I”, mais conhecidas como *I-Joist* ou *I-Beam*, são materiais estruturais em madeira, projetados para substituir a madeira estrutural tradicional em sistemas de vigas de piso e telhado. *I-Joists* são produtos engenheirados e são compostos por dois componentes principais diferentes. Como o nome indica, estes produtos têm uma seção transversal em forma de “I” com a mesa superior e a inferior, também denominados *flanges*, separados por uma alma estreita. Tais produtos são comercializados com várias dimensões e seção transversais diferentes, como apresentado na figura 07.

Figura 07: Seções transversais típicas, seção I, bem como seções retangulares ocas (seção caixão)



Fonte: Design of wooden structures (2022)

### 2.3.1 Aspectos históricos

De acordo com Fisette (2000), a primeira viga “I” em madeira foi criada em 1969, com o intuito de produzir um produto que conseguisse vencer grandes vãos livres, tivesse um custo mais baixo e que fosse mais fácil de transportar do que a madeira maciça tradicional. Assim surgiram as *I-Joists*, produtos feitos com almas de compensado delimitadas por mesas de madeira maciça. Porém, o custo final do produto ficou alto, com isso com o decorrer dos anos, foram desenvolvidos aprimoramentos nesse produto.

Ainda conforme explicado por Fisette (2000), a inovação mais eficiente das *I-Joist*, foram as alterações dos materiais utilizados. As mesas que antes eram de madeira maciça passaram a ser construídas por madeira LVL (madeira microlaminada), originando produtos de grandes comprimentos, baixos índices de defeitos e a resistência e a rigidez foram maximizadas. Outro ajuste foi na troca do material da alma, o compensado deu lugar à fibra orientada, painéis OSB, que são mais baratos, mais disponíveis e mais resistente do que o compensado no cisalhamento, porque nos painéis OSB todos as lascas se interligam.

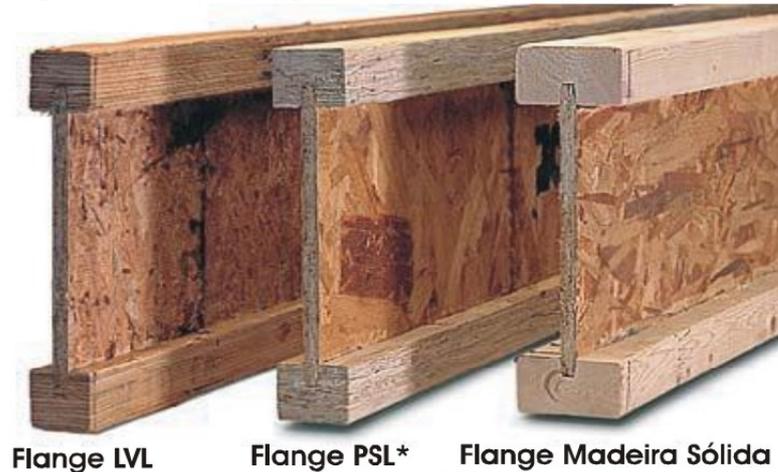
Tal produto rapidamente ganhou popularidade, por conta das vantagens que o material proporciona, expandindo rapidamente pela Europa, Ásia e América do Norte. Uma das vantagens que provocou essa aceitação do perfil otimizado sobre a madeira maciça tradicional é exatamente a otimização do produto. Conforme explica Ermides (2010), quando uma carga incide sobre a viga, a carga tensiona principalmente a parte superior e inferior da viga, as fibras superiores são comprimidas e as inferiores são tracionadas, a forma “I” tira vantagem desse fato, pois as vigas “I” não desperdiçam fibra onde ela não é necessária, no centro, focando principalmente nas mesas onde a tensão é máxima.

### 2.3.2 Materiais constituintes

A viga “I”, é composta de três peças de madeira coladas: a mesa superior, responsável por resistir as tensões de compressão; a alma, responsável por vencer os esforços de cisalhamento e flambagem; e a mesa inferior, que resiste as tensões de tração. Pensando nisso, a escolha de cada material é baseada nos esforços que tal peça terá que resistir.

As mesas, geralmente são compostas por madeira maciça, madeira serrada ou madeira microlaminada (figura 08). Entretanto, o material mais utilizado nas mesas é a madeira microlaminada (LVL), devido os seus benefícios quando comparado com os outros tipos de madeira. Vale ressaltar que o mesmo material é utilizado em ambas as mesas.

Figura 08: Exemplo de vigas “I” com três tipos de materiais nas mesas



Fonte: Portal da madeira (2009).

O Laminado de Lâminas Paralelas ou Madeira Microlaminada (LVL) “são produtos estruturais compostos de folhas de madeira com as fibras orientadas na mesma direção (longitudinal), oferecendo alta resistência, e surgiram há mais de 28 anos no mercado americano. Dependendo do processo e espécies utilizadas na sua manufatura, uma ampla gama de características de desempenho e custos do produto é alcançada” (Portal da Madeira, 2009).

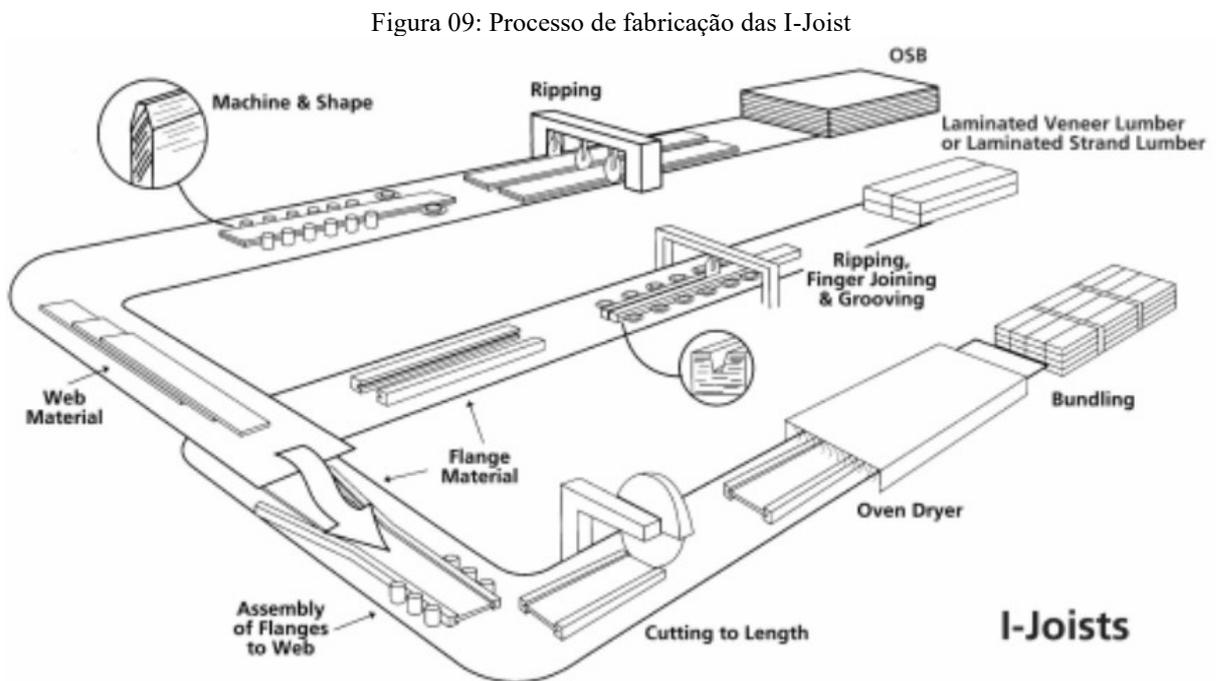
A resistência à flexão, da madeira LVL, e o peso muito inferior ao aço e concreto, tornam este derivado da madeira adequado para ser utilizado como elemento estrutural. O diferencial desse produto é a capacidade em cortar diferentes formas das folhas de LVL permitindo a inovação estrutural, formas angulares e curvas.

O principal objetivo da alma é resistir aos esforços de cisalhamento e fazer a união entre as mesas. Com base nisso, outros dois produtos engenheirados de madeira são destacados, o compensado e o painel OSB. Segundo Cerele (2022), “na comparação, o OSB tem qualidade superior e é mais durável. Além disso, é mais econômico, estável, versátil, resistente às chamas (tendo inclusive um complemento retardante ao fogo), e possui ótimo isolamento térmico e acústico”. Além de que, soma-se o fato que o compensado é produzido com lascas de tamanhos distintos e não alinhadas, o que gera bolsões de ar dentro da placa, tornando-a propensa a

rachaduras. Atualmente, na alma da viga é quase exclusivamente utilizado o painel de OSB como material, visto suas vantagens sobre o compensado.

### 2.3.3 Fabricação das *I-Joists*

Para a garantia do bom desempenho das vigas *I-Joist*, um dos cuidados que se deve tomar é no momento da fabricação do perfil. A seguir na figura 09, é mostrado a sequência da fabricação dos perfis de madeira com seção transversal em “I”.



Fonte: Wood I-Joists Awareness Guide (2021)

A fabricação do perfil inicia-se na preparação da alma, na primeira etapa é realizado o corte da placa OSB de acordo com a altura prevista para a viga. Em seguida, é iniciada a produção das mesas, de uma mesma madeira é realizado o corte das mesas, de acordo com as dimensões da viga que está sendo produzida, a fim de obter duas seções idênticas. Em sequência as mesas são direcionadas à serra Rex, onde ocorre a abertura das frestas para, posteriormente, fazer a ligação entre as mesas e alma. Cada fabricante determina o tipo de fresta para ligação entre a alma e as mesas. Na figura 10 são apresentados alguns tipos de ligação entre as mesas e a alma.

Figura 10: Tipos de geometrias alma/mesa



Fonte: RIBEIRO; SEDOSKI; GÓES (2011).

A próxima parte do processo de fabricação da I-Joist, envolve a aplicação de cola na junta das mesas e da alma. A cola utilizada é uma mistura de resina e endurecedor. O endurecedor permite que a resina cure rapidamente. A cabeça do sistema de pistola de cola insere cola nas frestas das mesas. A aplicação de cola é uma parte criticamente controlada no processo de fabricação de vigas, visto que a qualidade da viga está diretamente ligada a adesão entre as mesas e alma, garantindo os esforços sejam distribuídos de forma correta. Vale acentuar que atualmente algumas fábricas utilizam outras maneiras de conexão entre as mesas e a alma, tal como ligações adesivas.

Com a emenda realizada, o último passo é o corte da viga de acordo com o comprimento da viga que está sendo fabricada. Vale ressaltar que todo o processo é rigorosamente controlado, como por exemplo: verificação das dimensões das peças, checagem das frestas, verificação da temperatura da cola, tempos de cura da cola e inspeções finais na viga finalizada.

### 2.3.4 Normatização

Devido a diversos fatores, os perfis de madeira com seção transversal em “I”, ainda não foram desenvolvidas no Brasil. Um desses fatores é a ausência de uma norma que auxilie na fabricação e dimensionamento desse perfil. Atualmente, a única norma brasileira referente ao dimensionamento de estruturas de madeira é a NBR 7190/1982, porém na mesma não há informações suficientes relacionado ao perfil I.

Atualmente, as principais normas relacionadas ao assunto, são as normas americanas e a europeia, que detalham todo o memorial de cálculo que deve ser realizado com a finalidade de

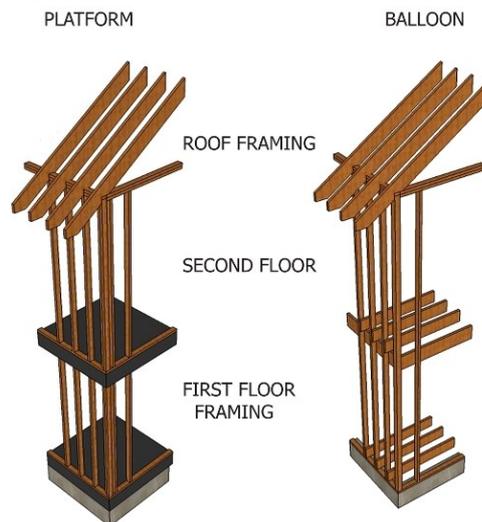
verificar as tensões que os perfis resistem. Além disso, nas normas americanas são detalhados os ensaios para verificação das tensões.

## 2.4 Wood Frame

O sistema *Wood Frame* é definido por Bolsoni (2020), como “um sistema construtivo industrializado e durável, estruturado por perfis de madeira e formando painéis de pisos, paredes e telhado que combinados com outros materiais de revestimento protegem contra as intempéries e dão estabilidade, além de proporcionar conforto térmico e acústico”. Dentre os acabamentos destaca-se os mais populares: placa cimentícia, madeira, PVC e drywall.

A estrutura *Frame* passou por diversas modificações até chegar no modelo atual. A principal inovação foi em 1900, quando o sistema de *Ballon Frame*, que caracterizava-se pela utilização de madeiras únicas que iam da fundação até a cobertura, deu lugar a estrutura de *Platform Frame*, que é uma estrutura com peças mais leves e menores, visto que a altura máxima de cada montante é limitada à altura do pavimento. A figura 11 mostrada as diferenças entre a estrutura *frame* antiga e a atual.

Figura 11: Comparação entre a estrutura Wood Frame atual e a utilizada até 1900



Fonte: Jordan Case (2020)

O sistema *Wood Frame* é bastante adaptável, visto que tal estrutura pode ser construída no próprio canteiro de obra ou utilizar a estrutura pré-fabricada. Entretanto, Bolsoni (2020) ressalta que “a mão de obra deve ser treinada para evitar problemas de execução e conexão de componentes desse sistema construtivo, pois apesar de ser constituída por peças simples e

pregadas, deve-se ter cautela na execução para que os erros não afetem a integridade total da edificação”.

A estrutura *Frame*, atualmente é o tipo de estrutura mais utilizado nos Estados Unidos, Canadá, parte da Europa e Oceania, devido a abundância e custos da matéria-prima, além das vantagens que o *Wood Frame* proporciona. Na figura 12 é apresentado um prédio construído em *Wood Frame*, situado em Araucária/PR.

Figura 12: Prédio em Wood Frame em Araucária/PR



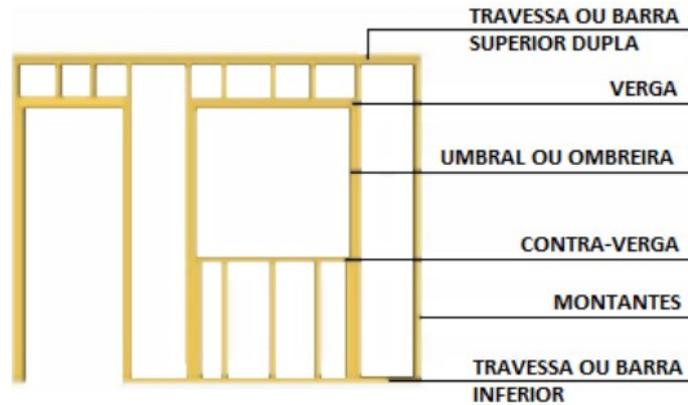
Fonte: Martins (2016)

#### 2.4.1 Elementos constituintes

Os componentes constituintes da estrutura *Wood Frame* podem ser divididos em componentes: estruturais, de vedação e acabamentos, onde os componentes estruturais são a base de sustentação da edificação e os componentes de vedação e revestimento são responsáveis por fazer o fechamento da edificação, aumentar o isolamento acústico e térmico do imóvel, além do conforto visual.

Na estrutura *frame*, as paredes têm a função estrutural, ou seja, são responsáveis por suportar o peso e os esforços da estrutura. Na figura 13 é apresentada uma parede estrutural, onde cada elemento tem uma função. A travessa superior é responsável por receber as cargas dos pavimentos superiores e distribuir para os montantes, que agem como pilares, absorvendo as cargas da travessa superior e distribuindo na travessa inferior, que por sua vez, distribui todo o carregamento na laje de piso inferior. As vergas e contra-vergas são responsáveis por encaminhar a carga das janelas e portas para os montantes.

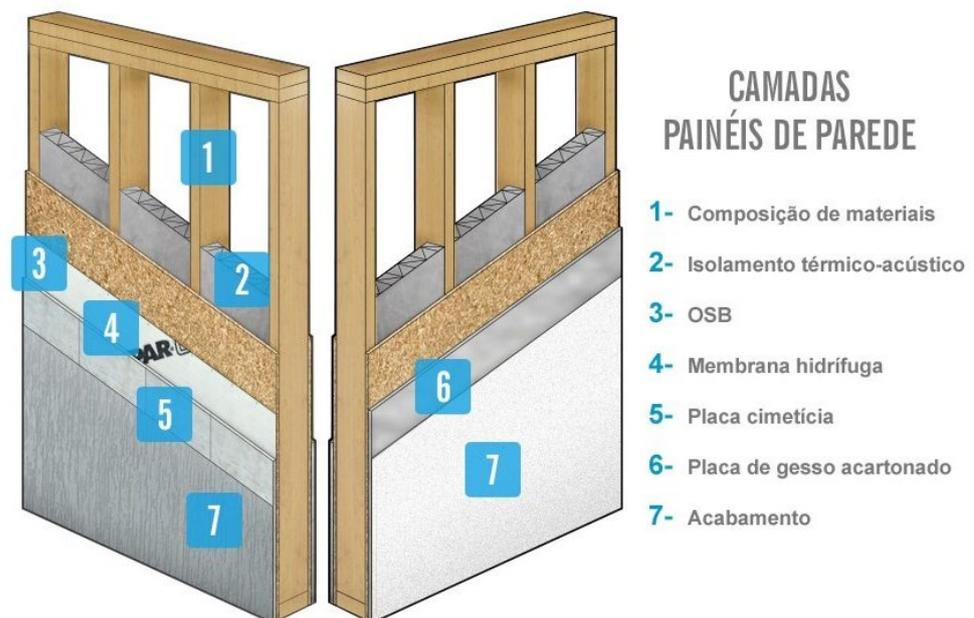
Figura 13: Parede estrutural em Wood Frame



Fonte: Oliveira e Barros (2020)

Os componentes de vedação e acabamento são de escolhas do projetista, que determina quais os materiais que serão usados para fazer o isolamento térmico e acústico, além dos revestimentos que a edificação possuirá. Na figura 14 é esquematizado os materiais utilizados para realizar a vedação e o revestimento de uma parede.

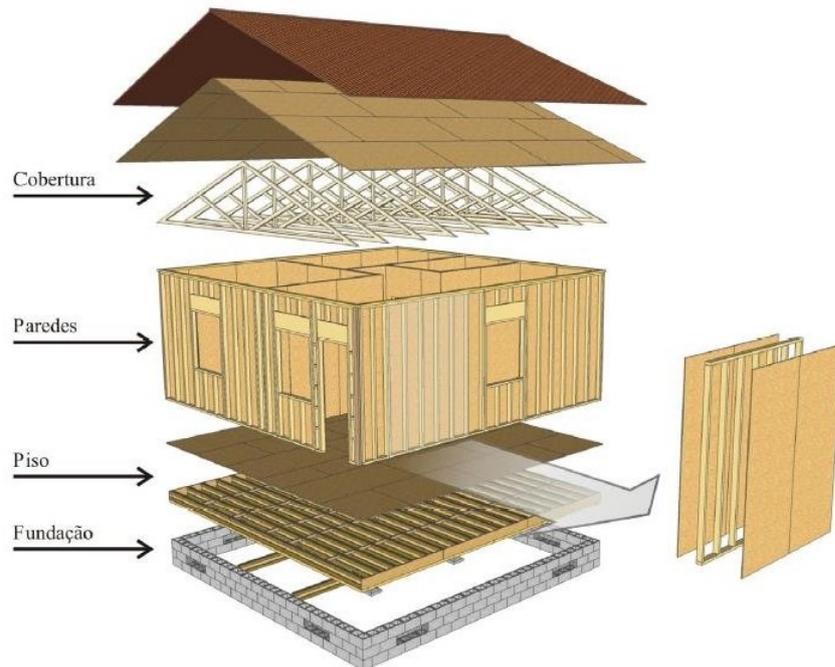
Figura 14: Representação da vedação e revestimento de uma parede em Wood Frame.



Fonte: DG (2014)

Por fim, na figura 15 é apresentado todos os componentes de uma estrutura *Wood Frame*. Vale salientar que os pisos são constituídos de vigas de madeira retangular ou *I-Joist*, que encaminham as cargas para a fundação (radier).

Figura 15: Estruturação de uma edificação em Wood Frame.



Fonte: DG (2014)

As figuras 16 a 19 exemplificam a estrutura de um piso onde as vigas I são utilizadas e que será o caso da análise feita neste trabalho.

Figura 16: Vista da estrutura de piso com I-Joist.



Fonte: Tim Carter (2021)

Figura 17: Vista superior da estrutura de piso com I-Joist.



Fonte: Líder Civil (2023)

Figura 18: Vista da estrutura de piso.



Fonte: Construction Canadá (2014)

Figura 19: Vista da estrutura Wood Frame com I-Joist



Fonte: MCR Safety (2021)

### 2.4.2 Vantagens do *Wood Frame*

Segundo Bolsoni (2020), o sistema atual é resultado de anos de desenvolvimento e pesquisa e pode-se destacar alguns benefícios quando comparado com outros sistemas estruturais, como:

- Design flexível: maior gama de revestimentos e materiais com relação ao sistema convencional de construção. Proporciona vãos longos e desenhos em curva. Facilidade em futuras reformas.
- Durabilidade: estima-se uma vida útil para edificações de 50 anos.
- Maior resistência térmica: proporciona um isolante térmico natural que minimiza a necessidade de aquecer e resfriar o ambiente com equipamentos mecânicos.
- Organização do canteiro de obra: o sistema é industrializado e requer menor quantidade de material na obra.
- Velocidade da obra: uma obra pode ser reduzida em 60% do tempo em comparação à alvenaria.
- Sustentabilidade: estruturas de madeira oriundas de florestas renováveis e diminui a quantidade de insumos, da utilização de transportes e processamento de materiais.
- Maior controle do processo construtivo: por ser uma estrutura industrializada é possível prever e controlar a quantidade, os custos e as fases de construção ainda em fase de projeto.

## 3 ESTUDO DE CASO

Para iniciar as análises desse trabalho, primeiramente realizou-se um projeto arquitetônico no *software* AutoCAD de um sobrado residencial de padrão construtivo médio-alto.

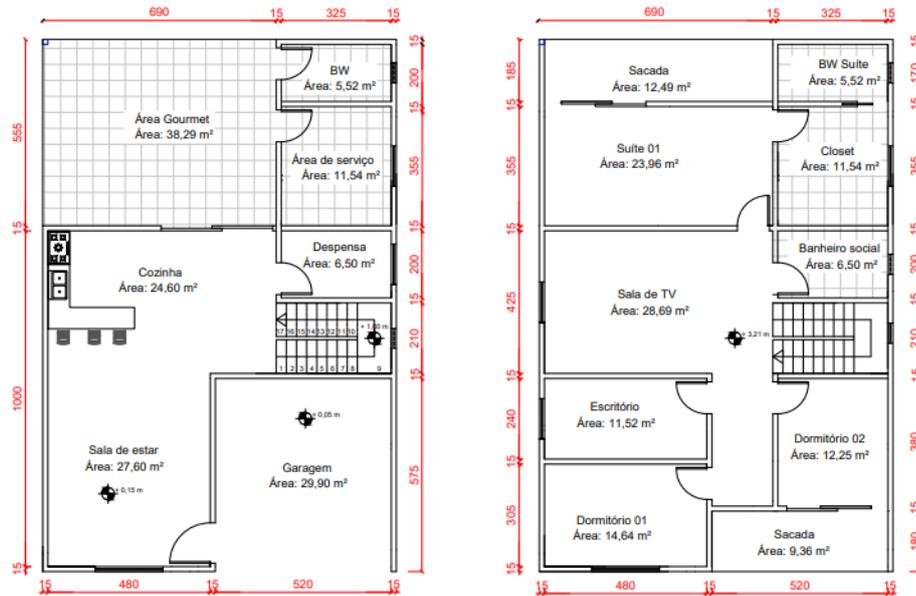
Com o *Sketchup* foi realizado o esboço do projeto estrutural, com estrutura *Wood Frame* e posteriormente, realizado o dimensionamento das vigas *I-Joists*, localizadas no piso do segundo pavimento. Por fim, é realizada a comparação entre o perfil I com o perfil retangular de madeira maciça.

A seguir é iniciado o estudo de caso, vale ressaltar que todo o dimensionamento das *I-Joists* foi realizado conforme as orientações da norma europeia Eurocode 5. Já o perfil retangular foi dimensionado conforme as orientações da norma brasileira NBR 7190:2022.

### 3.1 Definição do projeto arquitetônico

Utilizando o *software* AutoCAD, foi realizado o desenvolvimento do projeto arquitetônico de um sobrado residencial de padrão construtivo médio-alto, o qual possui 331,26 m<sup>2</sup>, distribuído em dois pavimentos espelhados. Na figura 20 são apresentadas as plantas do imóvel.

Figura 20: Plantas arquitetônicas



01 Planta térreo - Área construída: 165,63 m<sup>2</sup>    02 Planta 1º Andar - Área construída: 165,63 m<sup>2</sup>

Fonte: Autor

A seguir, na figura 21, é apresentada a fachada do imóvel

Figura 21: Fachada frontal do imóvel



Fonte: Autor

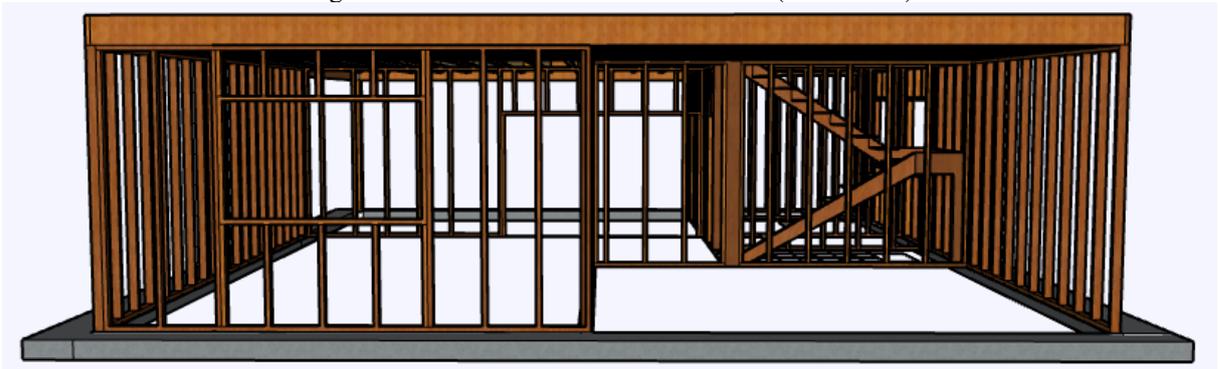
### 3.2 Concepção do projeto estrutural

A partir do projeto arquitetônico definido, foi elaborado o projeto estrutural. O tipo estrutural optado foi o *Wood Frame*, onde as lajes são constituídas de um conjunto de vigas que recebem as cargas do pavimento e as transferem para as travessas superiores da estrutura *frame*. As travessas agem como vigas, ou seja, recebem as cargas provenientes da laje e as distribui pelos montantes, que por sua vez atuam como pilares, recebendo as cargas das travessas superiores e enviando para as travessas inferiores.

O objetivo principal desse trabalho é a comparação entre a estrutura de piso de madeira utilizando vigas em perfis “I” e vigas de seção retangulares, portanto não será realizado o dimensionamento e verificações da estrutura *Wood Frame*, apenas a locação dos elementos constituintes.

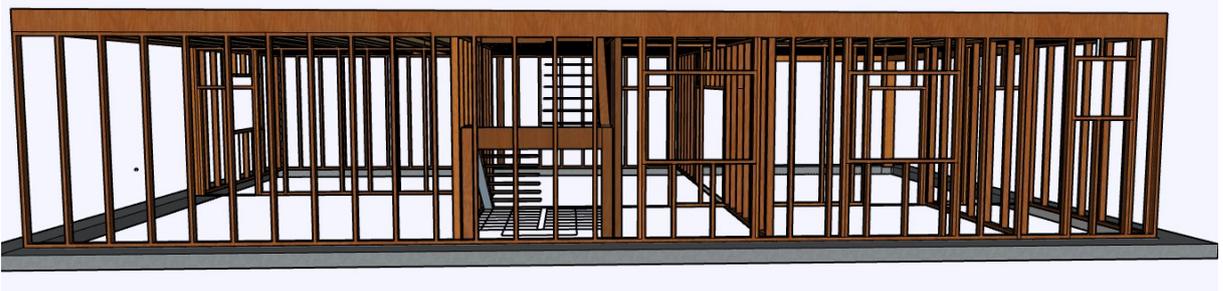
As estruturas *Wood Frame* são compostas pelas estruturas de piso, parede e cobertura. A estrutura de piso é composta por vigas de madeiras, as paredes estruturais são compostas por travessas inferiores, montantes e travessas superiores, e por fim, a cobertura é composta por treliças de madeira. Nas figuras 22 e 23 são apresentados a estrutura *Frame* do térreo em 3D. As vistas do segundo pavimento (figuras 24 e 25) e da cobertura (figuras 26 e 27) são apresentadas a seguir:

Figura 22: Estrutura *Wood Frame* – Térreo (vista frontal)



Fonte: Autor

Figura 23: Estrutura Wood Frame – Térreo (Vista lateral)



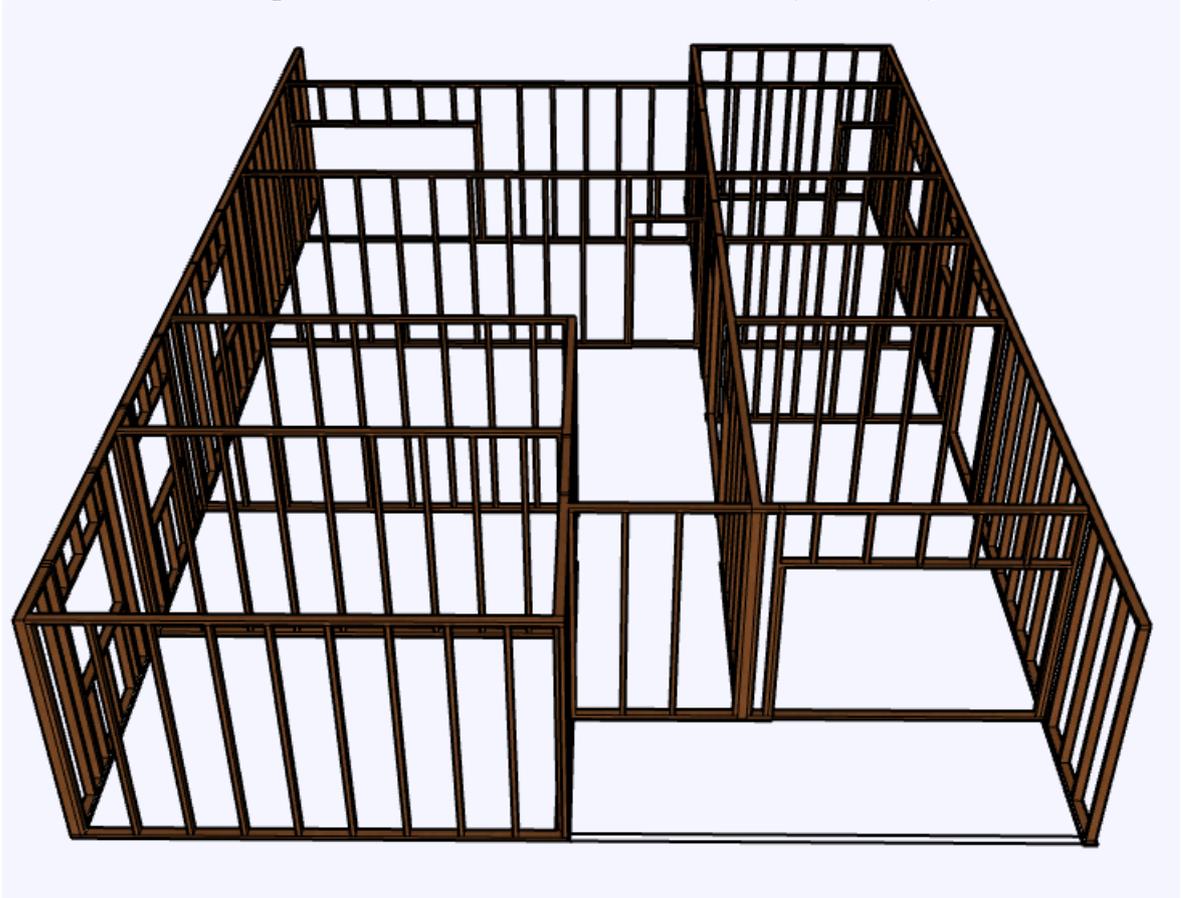
Fonte: Autor

Figura 24: Estrutura Wood Frame – 2º Pavimento (vista lateral)



Fonte: Autor

Figura 25: Estrutura Wood Frame – 2º Pavimento (vista frontal)



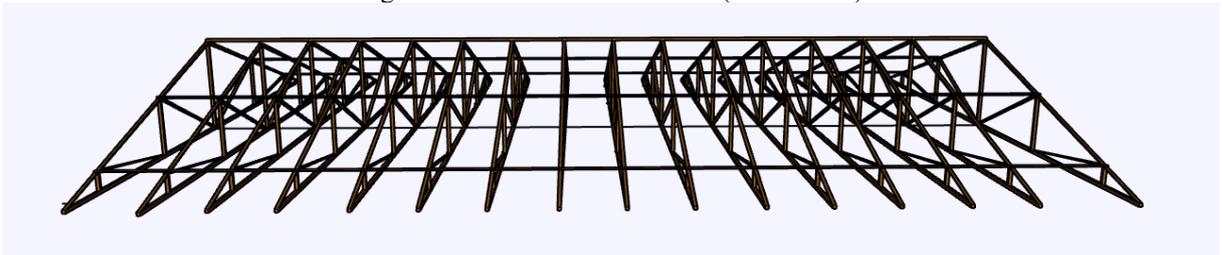
Fonte: Autor

Figura 26: Estrutura da cobertura (vista frontal)



Fonte: Autor

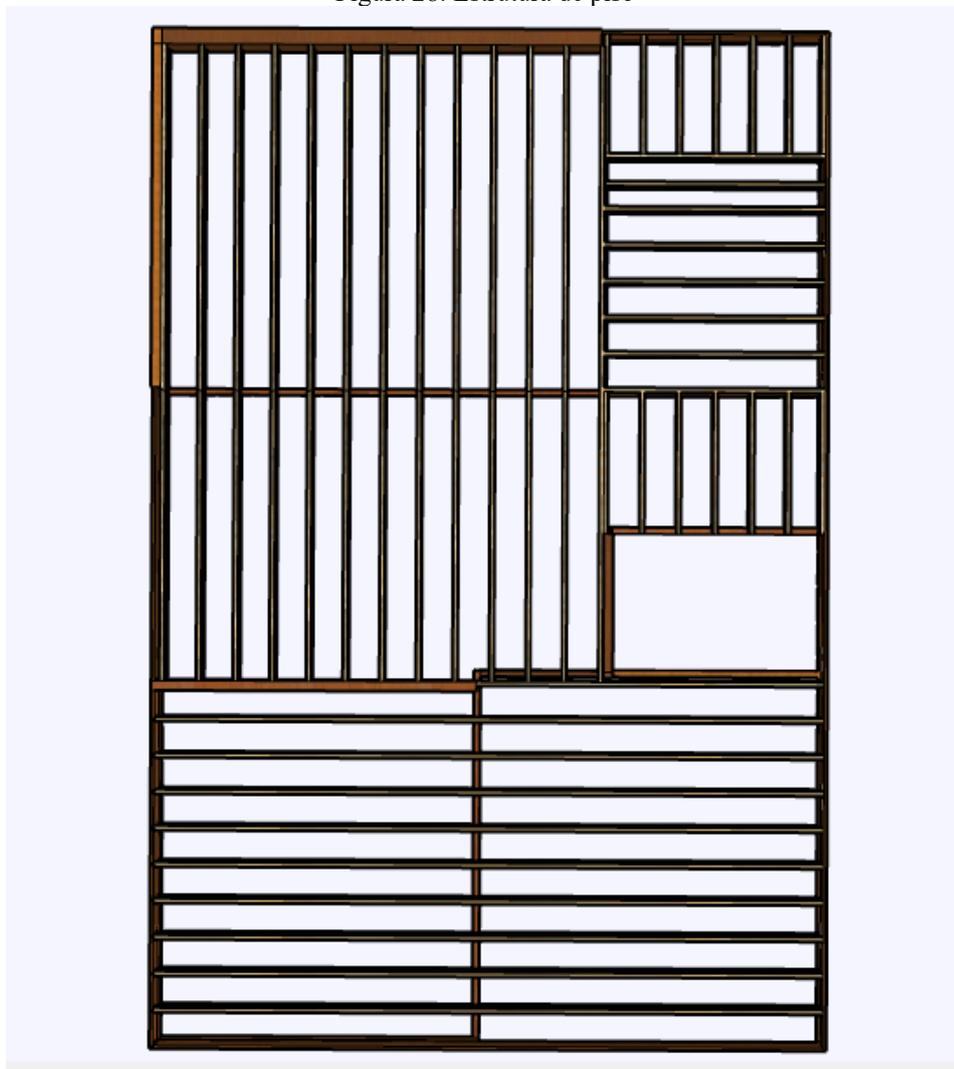
Figura 27: Estrutura da cobertura (vista lateral)



Fonte: Autor

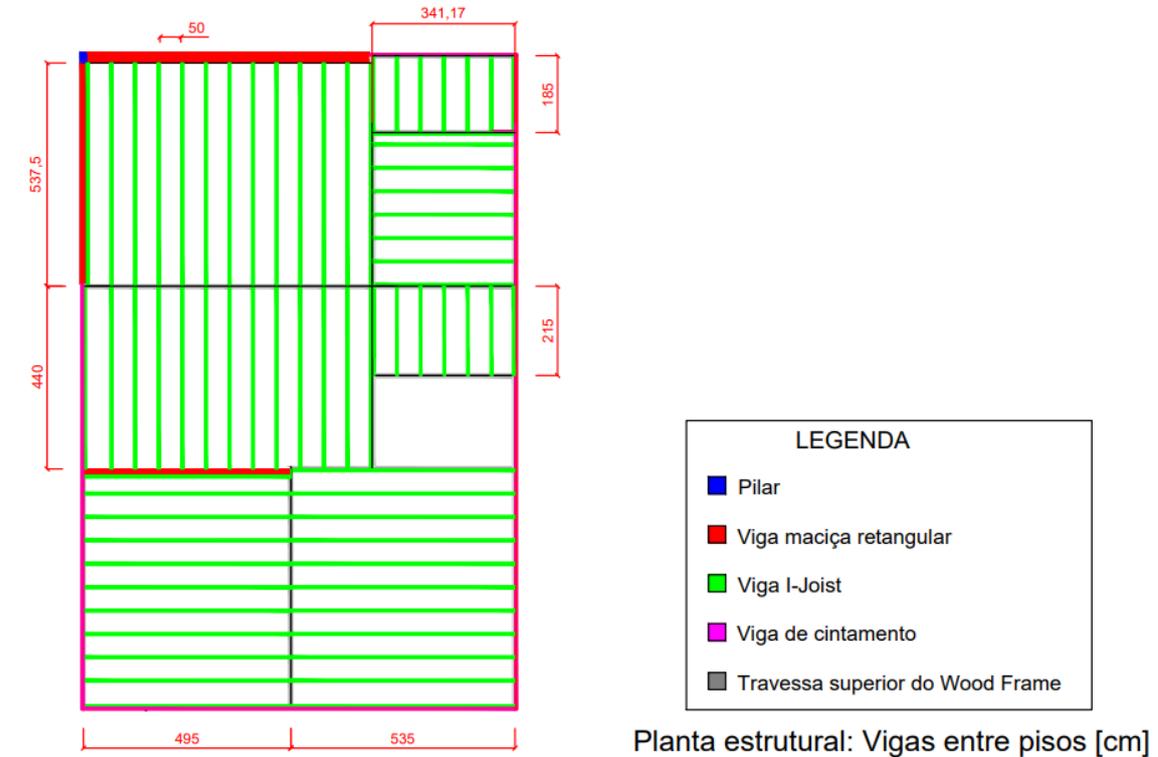
O piso entre o primeiro e o segundo pavimento é constituído por vigas de madeira de seção “I”, as denominadas *I-Joists*. As vigas de piso foram lançadas de acordo com a inercia de cada cômodo, sendo que foi adotado espaçamento de 50 cm entre si. A área gourmet é uma área aberta, ou seja, não possui a parede estrutural, sendo assim, foi necessário utilizar um pilar no canto extremo e vigas de madeira maciça interligando o pilar às paredes estruturais. Outra decisão tomada foi a utilização de uma viga de madeira laminada colada entre a sala e a cozinha, pois no segundo pavimento há paredes nessa região que transmitem as cargas diretamente para a laje. A seguir é mostrado a estrutura de piso (figura 28) e a planta do pré-dimensionamento das vigas (figura 29).

Figura 28: Estrutura de piso



Fonte: Autor

Figura 29: Locação das vigas I-Joists



Fonte: Autor

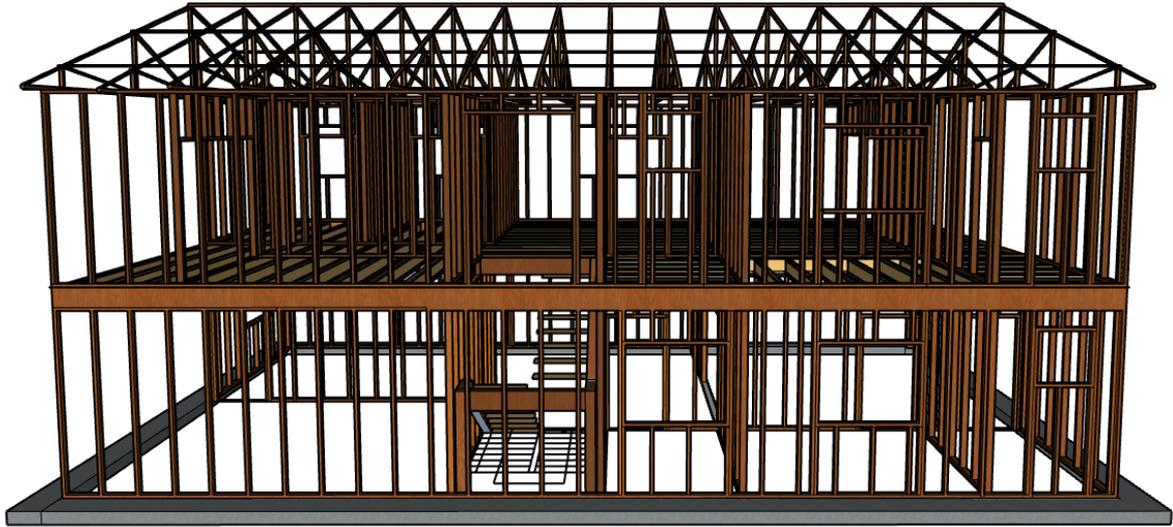
Vale ressaltar que as vigas entre a sala e a garagem e as vigas entre a cozinha e a área gourmet não foram consideradas como vigas contínuas, pois senão, teríamos que garantir o engastamento perfeito. E por fim, nas figuras 30 à 31 é apresentado o projeto estrutural completo da estrutura.

Figura 30: Vista da estrutura da edificação (vista frontal)



Fonte: Autor

Figura 31: Vista da estrutura da edificação (vista lateral)



Fonte: Autor

Figura 32: Vista da estrutura da edificação (vista posterior)

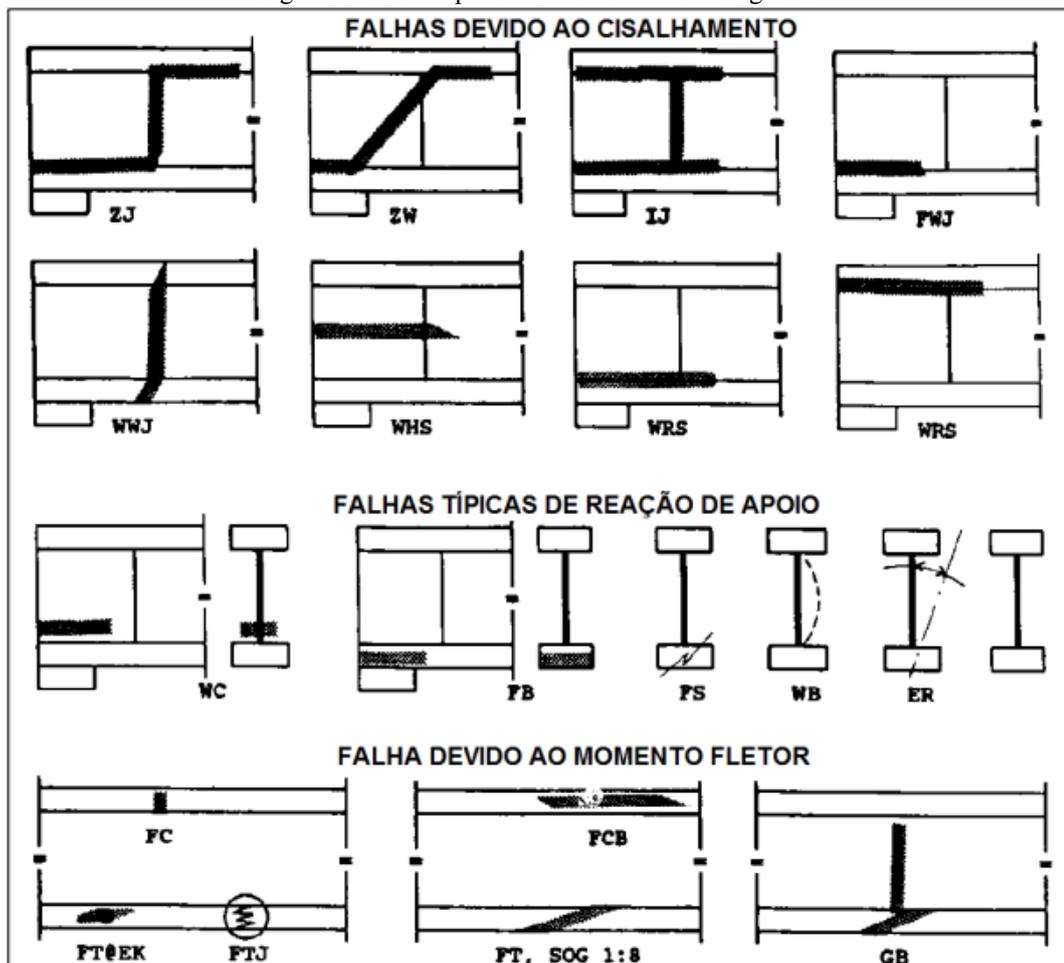


Fonte: Autor

### 3.3 Dimensionamento da estrutura de piso com vigas I-Joists

A partir serão realizadas as verificações necessárias para o dimensionamento da estrutura. Os principais modos de falha das *I-Joists* são devido ao momento fletor nas mesas, cisalhamento na alma e falhas nos apoios em decorrência da ligação entre as mesas e a alma. Na figura 33 são representadas as possíveis falhas do perfil “I”.

Figura 33: - Principais modos de falhas das vigas “I”



Fonte: Adaptado de ASTM (2004).

Sendo:

ZJ: a linha de ruptura passa horizontalmente ao longo da parte de baixo da ligação mesa/alma no final da viga, passa verticalmente ao longo de uma emenda alma-alma, e horizontalmente ao longo da parte superior da ligação mesa-alma no centro do vão.

ZW: parecido com ZJ exceto que a falha da alma não envolve a ligação alma-alma, usualmente a linha de ruptura acontece num ângulo perto de 45° com a vertical.

IJ: similar às falhas do tipo Z, porém as falhas da ligação mesa-alma se estendem para os dois lados da ligação alma-alma.

FWJ: ruptura na ligação mesa-alma superior ou inferior.

WWJ: ruptura na ligação alma-alma.

WHS: ruptura horizontal na alma (comum em almas de compensado).

WRS: laminação deficiente da alma na ligação mesa-alma (para almas de compensado).

WC: ruptura da alma, usual nas reações de apoio sem enrijecedores.

FB: esmagamento da mesa no apoio.

WB: flambagem da alma na reação de apoio, geralmente sem enrijecedores.

FS: ruptura da mesa devido à ligação na reação de apoio.

ER: rotação na ponta causando momento na viga (necessidade de contraventamento lateral).

FT: ruptura na mesa devido à tração.

FTJ: ruptura de tração na emenda finger joint da mesa.

FC: ruptura de compressão a flexão, comum perto dos pontos de aplicação da carga.

FCB: ruptura na mesa devido à flambagem.

SOG: ruptura devido à inclinação das fibras nas mesas. Ou local, como perto de nós em geral.

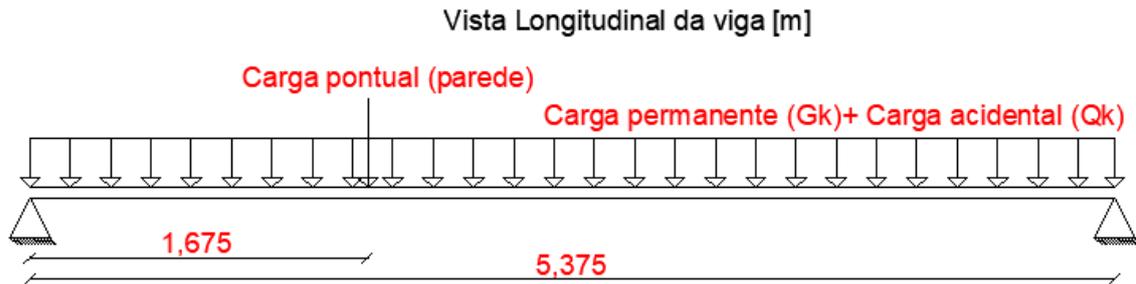
GB: ruptura na mesa inferior sem deslocamento da emenda.

### 3.3.1 Determinação do carregamento

O primeiro passo é fazer o levantamento de cargas permanentes e acidentais. O carregamento permanente é provindo do peso próprio da viga e a soma do peso dos revestimentos da viga, que são: placa de OSB sobre a mesa superior da viga, revestimento cerâmico sobre a placa de OSB e gesso acartonado, utilizado como forro. A carga acidental é obtida através da tabela 2 da NBR 6120/1980, a qual indica as cargas acidentais em razão do ambiente em que a viga está localizada.

Inicialmente é pré-selecionado um perfil I-Joist para posteriormente realizar as verificações e definir o perfil mais otimizado para a edificação. A seleção do perfil é feita com o auxílio da tabela 1, a qual permite selecionar as dimensões mínimas do perfil, relacionando o vão livre da viga e o espaçamento entre as vigas. A viga escolhida, para iniciar o dimensionamento, situa-se na área gourmet, visto que nessa região o vão livre é maior e tem a carga de uma parede não estrutural incidindo diretamente sobre as vigas. Na figura 34 é apresentado a viga escolhida.

Figura 34: Vista longitudinal da viga que será dimensionada.



Fonte: Autor

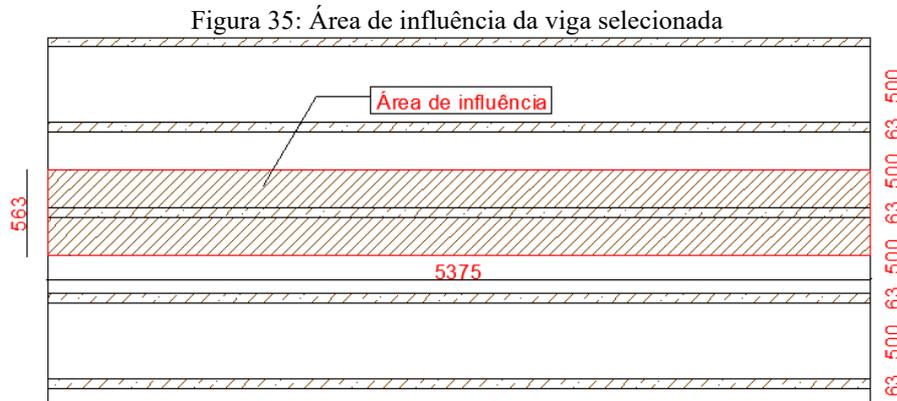
Tabela 01: Vãos permitidos por APA EWS Performance Rated I-Joists – Vão simples (bi-apoiada)

Altura (mm)	Série da viga	Vão simples (m)			
		Espaçamento entre vigas (cm)			
		30	40	50	60
241	PRI - 20	4,9	4,5	4,3	4,0
	PRI - 30	5,2	4,7	4,5	4,2
	PRI - 40	5,4	5,0	4,7	4,4
	PRI - 50	5,4	5,0	4,7	4,4
	PRI - 60	5,7	5,2	4,9	4,6
302	PRI - 20	5,9	5,4	5,1	4,7
	PRI - 30	6,2	5,7	5,4	5,0
	PRI - 40	6,5	5,9	5,6	5,1
	PRI - 50	6,5	5,9	5,6	5,2
	PRI - 60	6,8	6,2	5,8	5,4
	PRI - 70	7,0	6,4	6,0	5,6
	PRI - 80	7,5	6,8	6,4	6,0
	PRI - 90	7,7	7,0	6,6	6,1
356	PRI - 40	7,3	6,7	6,2	5,6
	PRI - 50	7,3	6,7	6,3	5,9
	PRI - 60	7,7	7,0	6,6	6,2
	PRI - 70	8,0	7,2	6,8	6,4
	PRI - 80	8,5	7,7	7,3	6,8
	PRI - 90	8,7	7,9	7,5	7,0
406	PRI - 40	8,1	7,4	6,7	6,0
	PRI - 50	8,1	7,4	7,0	6,1
	PRI - 60	8,5	7,8	7,3	6,8
	PRI - 70	8,8	8,0	7,6	7,0
	PRI - 80	9,4	8,5	8,1	7,5
	PRI - 90	9,6	8,8	8,3	7,7

Fonte: Adaptado de APA Performance Rated I-Joists (2012)

Analisando a tabela 01, define-se que a altura mínima para a viga é de 300 milímetros e largura mínima das mesas é de 60 milímetros, pois o vão livre da viga é de 5,38 metros e o espaçamento

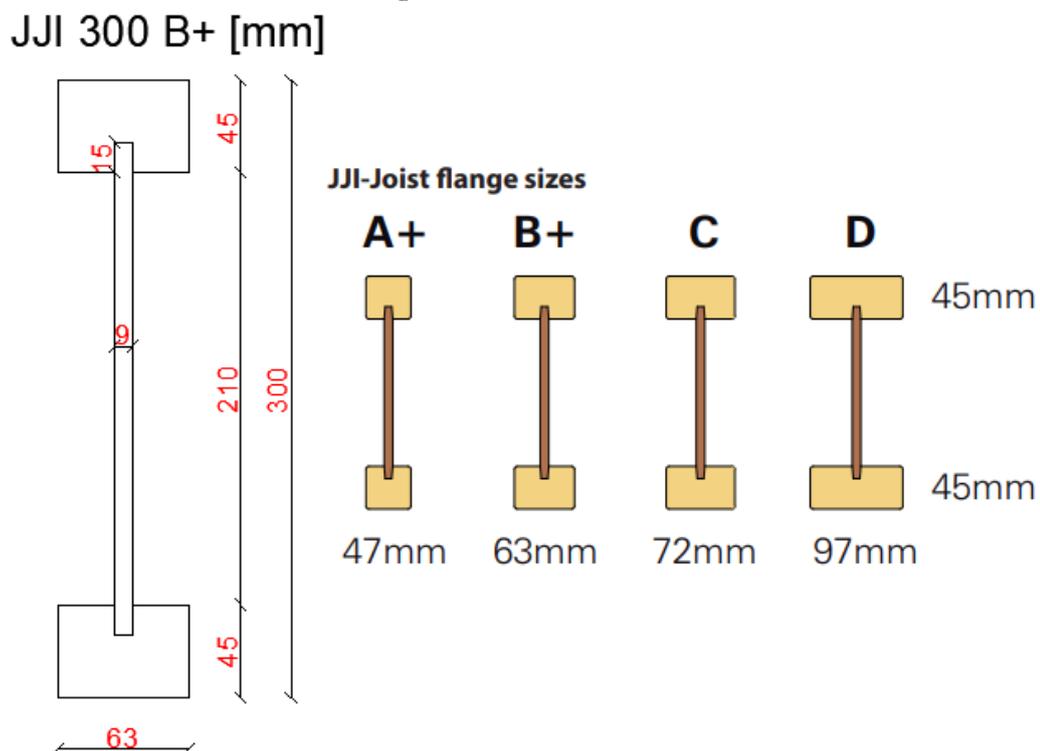
entre os centros da viga é superior a 50 centímetros. A seguir é representada a área de influência (figura 35) da viga escolhida.



Fonte: Autor

Utilizando o catálogo do *JJI-Joists*, foi escolhido o perfil JJI 300 B+ (figura 36), o qual possui 300 milímetros de altura e 63 milímetros de largura nas mesas.

Figura 36: Perfil JJI 300 B+



Fonte: Autor (2023)

O peso próprio da viga é informado no catálogo da fabricante das *JJI-Joists* (tabela 02), portanto, o peso próprio do perfil selecionado é de 3,82 Kg/m, equivalente a 0,0382 KN/m.

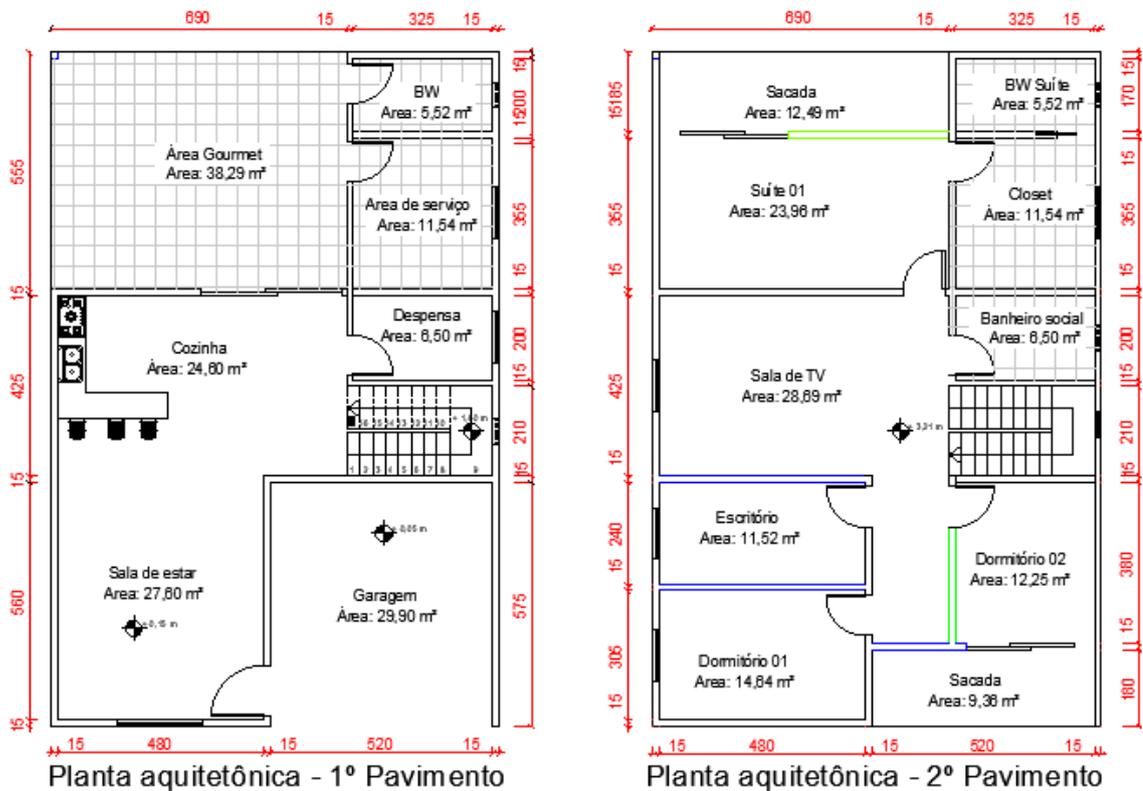
Tabela 02: Propriedades das JJI-Joists

Joist Type	Depth	Bending moment capacity	Bending stiffness	Shear strength capacity	Shear stiffness	Intermediate bearing capacity – minimum 89mm bearing length		End bearing capacity – minimum 45mm bearing length		End bearing capacity – minimum 89mm bearing length		Weight per metre length
		M	EI	V	GA	N/S	W/S	N/S	W/S	N/S	W/S	W
	(mm)	(kNm)	(10 <sup>9</sup> Nmm <sup>2</sup> )	(kN)	(10 <sup>6</sup> N)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kg/m)
JJI 195 A+	195	5.67	305.1	10.64	1.234	16.37	16.37	8.50	8.50	10.33	10.76	2.56
JJI 195 C		8.03	505.6	12.44	1.234	25.07	25.07	12.90	13.02	13.18	16.48	3.57
JJI 220 A+	220	6.60	407.4	11.33	1.477	16.37	16.37	8.50	8.50	10.33	10.76	2.70
JJI 220 B+		8.37	588.5	12.48	1.477	21.94	21.94	11.39	11.39	13.18	14.42	3.35
JJI 220 C		9.32	667.3	13.09	1.477	25.07	25.07	12.90	13.02	13.18	16.48	3.72
JJI 220 D		11.86	941.3	14.71	1.477	26.66	30.00	12.90	17.54	13.18	22.20	4.73
JJI 235 A+	235	7.17	472.4	11.77	1.623	16.37	16.37	8.50	8.50	10.33	10.76	2.79
JJI 235 B+		9.08	678.1	12.90	1.623	21.94	21.94	11.39	11.39	13.18	14.42	3.44
JJI 235 C		10.11	771.3	13.51	1.623	25.07	25.07	12.90	13.02	13.18	16.48	3.80
JJI 235 D		12.85	1088.0	15.12	1.623	26.66	30.00	12.90	17.54	13.18	22.20	4.82
JJI 245 A+	245	7.54	518.0	12.08	1.720	16.37	16.37	8.50	8.50	10.33	10.76	2.85
JJI 245 B+		9.55	737.2	13.19	1.720	21.94	21.94	11.39	11.39	13.18	14.42	3.50
JJI 245 C		10.64	844.4	13.80	1.720	25.07	25.07	12.90	13.02	13.18	16.48	3.86
JJI 245 D		13.52	1195.4	15.40	1.720	26.66	30.00	12.90	17.54	13.18	22.20	4.87
JJI 300 A+	300	9.67	816.3	13.86	2.255	16.37	16.37	8.50	8.50	10.33	10.76	3.17
JJI 300 B+		12.21	1121.9	14.91	2.255	21.94	21.94	11.39	11.39	12.66	14.42	3.82
JJI 300 C		13.58	1319.5	15.49	2.255	25.07	25.07	12.08	13.02	12.66	16.48	4.18
JJI 300 D		17.22	1899.0	17.07	2.255	26.66	30.00	12.08	17.54	12.66	22.20	5.20
JJI 350 C	350	16.31	1899.6	17.16	2.741	25.07	25.07	10.22	13.02	10.93	16.48	4.48
JJI 350 D		20.65	2647.6	18.70	2.741	26.66	30.00	10.22	17.54	10.93	22.20	5.49
JJI 400 C	400	19.09	2673.0	18.91	3.227	25.07	25.07	8.20	13.02	10.17	16.48	4.77
JJI 400 D		24.12	3428.0	20.41	3.227	25.79	30.00	8.20	17.54	10.17	22.20	5.78
JJI 450 D	450	27.64	4170.4	22.18	3.713	21.50	30.00	6.79	17.54	9.23	22.20	6.07

Fonte: Catálogo JJI-Joists (2021)

Nas estruturas *Wood Frame*, as paredes são subdivididas em dois grupos: as paredes estruturais e as paredes não estruturais. As paredes estruturais descarregam diretamente seu peso próprio, bem como as cargas providas do pavimento superior, no painel estrutural do pavimento inferior. Já as paredes não estruturais têm suas cargas consideradas como cargas uniformemente distribuídas nas vigas de piso abaixo delas. Nos casos em que as paredes seguem a orientação das vigas, o peso próprio é distribuído somente para a viga imediatamente abaixo do painel; já nos casos em que a orientação das paredes é ortogonal às vigas de piso, a carga é distribuída para todas as vigas, de forma pontual, nas quais a parede está em contato. No segundo pavimento há paredes não estruturais que estão descarregando o seu peso próprio diretamente nas vigas, conforme apresentado na figura 37, onde as paredes destacadas em azul estão descarregando seu peso próprio diretamente na viga inferior, enquanto as vigas em verde estão descarregando seu peso de forma ortogonal às vigas de piso.

Figura 37: Projeto arquitetônico destacando as paredes não estruturais



Fonte: Autor

A viga que está sendo dimensionada situa-se na área gourmet, onde tem uma parede não estrutural descarregando seu peso de forma ortogonal as vigas. Através de uma revisão bibliográfica, pode-se concluir que as paredes internas, com estrutura *Wood Frame*, quando finalizadas pesam próximo de  $75 \text{ kg/m}^2$  e as paredes externas finalizadas pesam  $150 \text{ kg/m}^2$ . Levando em consideração a altura e o comprimento da parede, pode-se considerar que o peso total da parede é  $1.169,06 \text{ kg}$  distribuídas sobre as 13 vigas da área gourmet, onde cada viga terá que suportar  $89,93 \text{ kg}$ , ou seja,  $0,8993 \text{ kN}$ .

A carga permanente total será a soma do peso próprio da viga, a cargas da parede não estrutural sobre o piso e o peso dos revestimentos da viga. A seguir é calculado o peso dos revestimentos utilizados:

- Peso da placa de OSB

A placa escolhida foi a placa OSB Home Plus 2.400 X 1.200 X 18,3 mm LP Brasil, a qual pesa  $33,70 \text{ kg}$  por chapa, ou seja, a placa OSB possui  $11,70 \text{ kg/m}^2$ , equivalente a  $0,1170 \text{ kN/m}^2$

- Peso do piso laminado

O piso escolhido foi o New Way Durafloor, que possui 0,187m X 1,34 m, e 7 cm de espessura. Cada piso possui 1,625 kg, portanto, o piso possui 6,485 kg/m<sup>2</sup>, equivalente a 0,0649 kN/m<sup>2</sup>

- Peso do gesso acartonado

Para o forro da laje foi utilizado a chapa Drywall Standard (ST) de 12,5 mm, com peso da placa de 8,8 kg/m<sup>2</sup>, equivalente à 0,088 kN/m<sup>2</sup>.

A carga acidental é obtida através da tabela 2 da NBR 6120/1980. De acordo com a referida tabela, pode-se concluir que a carga acidental é 1,5 kN/m<sup>2</sup>.

Na tabela 03 consta o carregamento uniformemente distribuído total da viga e na figura 38 o carregamento que a viga terá que suportar.

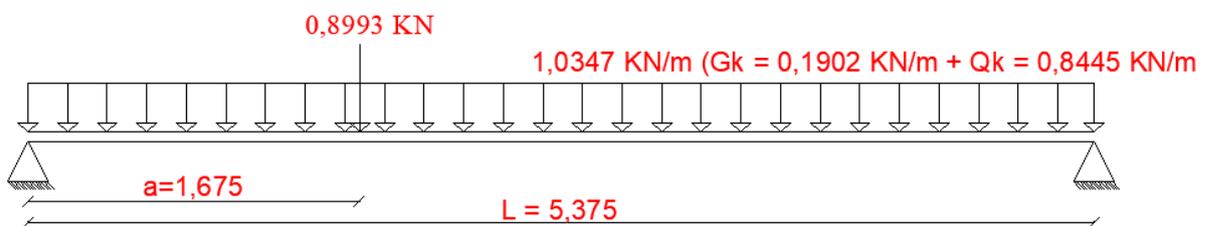
Tabela 03: Carga uniformemente distribuído

Carregamento uniformemente distribuído total			
Material	Peso (kN/m <sup>2</sup> )	Largura de influência (m)	carregamento uniformemente distribuído (KN/m)
Viga	-	0,563	0,0382
Placa OSB	0,117		0,0659
Piso laminado	0,065		0,0365
Gesso acartonado	0,088		0,0495
Carga acidental	1,500		0,8445
Total			1,0347

Fonte: Autor

Figura 38: Carregamento da viga

Vista Longitudinal da viga [m]



Fonte: Autor

### 3.3.2 Propriedades mecânicas da JJI 300 B+

De acordo com o catálogo da fabricante do perfil, os mesas serão constituídas de madeira maciça de classe 24 e a alma de placa de OSB/03. Utilizando a norma europeia BS EN 338:2016, pode-se determinar as propriedades mecânicas das mesas do perfil. Na tabela 04 são apresentadas as propriedades da madeira maciça europeia.

Tabela 04: Propriedades da madeira maciça

Property	C24	C27	C30	C35	C40
<b>Strength values</b>					
Bending parallel to grain $f_{m,k}$	24	27	30	35	40
Tension parallel to grain $f_{t,0,k}$	14,5	16,5	19	22,5	26
Tension perpendicular to grain $f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compression parallel to grain $f_{c,0,k}$	21	22	24	25	27
Compression perpendicular to grain $f_{c,90,k}$	2,5	2,5	2,7	2,7	2,8
Shear $f_{v,k}$	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
<b>Stiffness value for capacity analysis</b>					
Elastic modulus $E_{0,05}$	7 400	7 700	8 000	8 700	9 400
<b>Stiffness values for deformation calculations, mean values</b>					
Elastic modulus parallel to grain $E_{0,mean}$	11 000	11 500	12 000	13 000	14 000
Elastic modulus perpendicular to grain $E_{90,mean}$	370	380	400	430	470
Shear modulus $G_{mean}$	690	720	750	810	880
<b>Density</b>					
Density $\rho_k^{1)}$	350	360	380	390	400
Density $\rho_{mean}^{1)}$	420	430	460	470	480

Fonte: Swedish Wood (2022)

Assim sendo, tem-se os valores característicos da madeira utilizada nas mesas:

Resistência de flexão ( $f_{m,k}$ )	$\left( \begin{array}{c} 24,0 \text{ MPa} \\ 14,5 \text{ MPa} \\ 21,0 \text{ MPa} \\ 4,0 \text{ MPa} \\ 11.000 \text{ MPa} \end{array} \right)$
Resistência à tração paralela ( $f_{t,0,k}$ )	
Resistência de compressão ( $f_{c,0,k}$ )	
Resistência de cisalhamento ( $f_{v,k}$ )	
Modulo de Elasticidade ( $E_{0,m}$ )	

De forma análoga, tem-se os valores característicos da OSB/03 (tabela 05) utilizada para a alma.

Tabela 05: Propriedades da placa OSB

Nominal thickness $t_{nom}$ (mm)	OSB/2, OSB/3 <sup>4)</sup>			OSB/4 <sup>4)</sup>		
	> 6 – 10	> 10 – 18	> 18 – 25	> 6 – 10	> 10 – 18	> 18 – 25
<b>Strength values</b>						
Bending $f_m$ parallel to the strands // <sup>2)</sup>	18,0	16,4	14,8	24,5	23,0	21,0
Bending $f_m$ perpendicular to the strands $\perp$ <sup>3)</sup>	9,0	8,2	7,4	13,0	12,2	11,4
Tension $f_t$ parallel to the strands // <sup>2)</sup>	9,9	9,4	9,0	11,9	11,4	10,9
Tension $f_t$ perpendicular to the strands $\perp$ <sup>3)</sup>	7,2	7,0	6,8	8,5	8,2	8,0
Compression $f_c$ parallel to the strands // <sup>2)</sup>	15,9	15,4	14,8	18,1	17,6	17,0
Compression $f_c$ perpendicular to the strands $\perp$ <sup>3)</sup>	12,9	12,7	12,4	14,3	14,0	13,7
Panel shear $f_v$	6,8	6,8	6,8	6,9	6,9	6,9
Planar shear $f_r$	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1
<b>Mean stiffness values <sup>3)</sup></b>						
Bending $E_m$ parallel to the strands // <sup>2)</sup>	4 930	4 930	4 930	6 780	6 780	6 780
Bending $E_m$ perpendicular to the strands $\perp$ <sup>3)</sup>	1 980	1 980	1 980	2 680	2 680	2 680
Tension $E_t$ parallel to the strands // <sup>2)</sup>	3 800	3 800	3 800	4 300	4 300	4 300
Tension $E_t$ perpendicular to the strands $\perp$ <sup>3)</sup>	3 000	3 000	3 000	3 200	3 200	3 200
Compression $E_c$ parallel to the strands // <sup>2)</sup>	3 800	3 800	3 800	4 300	4 300	4 300
Compression $E_c$ perpendicular to the strands $\perp$ <sup>3)</sup>	3 000	3 000	3 000	3 200	3 200	3 200
Panel shear $G_v$	1 080	1 080	1 080	1 090	1 090	1 090
Planar shear $G_r$	50	50	50	60	60	60
<b>Density</b>						
Density $\rho_k$	550	550	550	550	550	550

Fonte: Swedish Wood (2022)

Dessa forma tem-se:

Resistência à tração ( $f_{t, w, k}$ )

Resistência à compressão ( $f_{c, w, k}$ )

Resistência ao cisalhamento ( $f_{v, w, k}$ )

Resistência ao cisalhamento (rolamento) ( $f_{r, w, k}$ )

Modulo de elasticidade ( $E_{w, m}$ )

Modulo de cisalhamento ( $G_{w, m}$ )

9,9 MPa
15,9 MPa
6,8 MPa
1,0 MPa
3.800 MPa
1.080 MPa

### 3.3.3 Valores de projeto das propriedades dos materiais

Para determinar os valores de projeto foi utilizado a norma europeia, visto que todas as verificações estão seguindo as recomendações da norma europeia EN 1995-1-1: Eurocode 5.

Para iniciar precisa-se determinar o  $K_{mod}$ , que é um coeficiente que ajusta os valores da resistência em função da influência de diversos fatores. Na norma europeia, os valores de  $K_{mod}$  são tabelados em função do tipo de madeira, classe de serviço e classe de duração das cargas. Na tabela 06 são apresentados os coeficientes  $K_{mod}$ .

Tabela 06: Valores de  $K_{mod}$ 

Material	Standard	Service class	Load-duration class				
			Permanent action	Long term action	Medium term action	Short term action	Instantaneous action
Solid timber	EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Glued laminated timber	EN 14080	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
LVL	EN 14374, EN 14279	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Plywood	EN 636 Type EN 636-1 Type EN 636-2 Type EN 636-3	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
OSB	EN 300 OSB/2 OSB/3, OSB/4 OSB/3, OSB/4	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
		1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
		2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Particle-board	EN 312 Type P4, Type P5 Type P5 Type P6, Type P7 Type P7	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
		2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
		1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
		2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Fibreboard, hard	EN 622-2 HB.LA, HB.HLA 1 or 2 HB.HLA1 or 2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
		2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
Fibreboard, medium	EN 622-3 MBH.LA1 or 2 MBH.HLS1 or 2 MBH.HLS1 or 2	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
		1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
		2	–	–	–	0,45	0,80
Fibreboard, MDF	EN 622-5 MDF.LA, MDF.HLS MDF.HLS	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
		2	–	–	–	0,45	0,80

Fonte: EN 1995-1-1: Eurocode 5

As cargas sobre a viga são enquadradas como carregamento permanente, visto que se trata do peso próprio da viga. Pode-se definir também que tal viga é caracterizada como classe de serviço I, pois a madeira é protegida de umidade. Com essas informações e analisando a tabela 06, conclui-se que o  $K_{mod}$  das mesas é 0,60 e o  $K_{mod}$  da alma é 0,40.

Outro fator que deve ser determinado é o fator de fluência ( $K_{def}$ ), que avalia a deformação por fluência, levando em consideração a classe de serviço. A tabela 07 determina o fator de fluência, com base no tipo de material e classe de serviço.

Tabela 07: Valores de  $K_{def}$ 

Material	Standard	Service class		
		1	2	3
Solid timber	EN 14081-1	0,60	0,80	2,00
Glued Laminated timber	EN 14080	0,60	0,80	2,00
LVL	EN 14374, EN 14279	0,60	0,80	2,00
Plywood	EN 636			
	Type EN 636-1	0,80	–	–
	Type EN 636-2	0,80	1,00	–
	Type EN 636-3	0,80	1,00	2,50
OSB	EN 300			
	OSB/2	2,25	–	–
	OSB/3, OSB/4	1,50	2,25	–
Particleboard	EN 312			
	Type P4	2,25	–	–
	Type P5	2,25	3,00	–
	Type P6	1,50	–	–
	Type P7	1,50	2,25	–
Fibreboard, hard	EN 622-2			
	HB.LA	2,25	–	–
	HB.HLA1, HB.HLA2	2,25	3,00	–
Fibreboard, medium	EN 622-3			
	MBH.LA1, MBH.LA2	3,00	–	–
	MBH.HLS1, MBH.HLS2	3,00	4,00	–
Fibreboard, MDF	EN 622-5			
	MDF.LA	2,25	–	–
	MDF.HLS	2,25	3,00	–

Fonte: EN 1995-1-1: Eurocode 5

As mesas são compostas de madeira maciça e classe de serviço I, portanto, o fator de fluência ( $K_{def}$ ) é 0,60. Já a alma é composta por placa de OSB, portanto o  $K_{def}$  para a alma é 1,50.

A seguir deve-se determinar o coeficiente de ponderação da resistência para estado limite último. Na norma europeia (Eurocode 5), o fator de ponderação da resistência é baseado no tipo de madeira, entretanto, na norma brasileira (NBR 7190:2022), tal coeficiente é determinado de acordo com o tipo tensão. Nesse caso optou-se por seguir os valores tabelados na norma europeia, visto que todo o dimensionamento está sendo baseado nela. Na tabela 08 é determinado os valores de ponderação ( $\gamma_w$ ).

Tabela 08: Coeficientes de ponderação ( $\gamma_w$ )

Fundamental combinations:	
Solid timber	1,3
Glued laminated timber	1,25
LVL, plywood, OSB,	1,2
Particleboards	1,3
Fibreboards, hard	1,3
Fibreboards, medium	1,3
Fibreboards, MDF	1,3
Fibreboards, soft	1,3
Connections	1,3
Punched metal plate fasteners	1,25
Accidental combinations	1,0

Fonte: EN 1995-1-1: Eurocode 5

Portanto, analisando a tabela 08, determina-se que o coeficiente de ponderação ( $\gamma_w$ ) é 1,30 para as mesas e 1,20 para a alma.

E por último, é definido o fator de modificação  $K_h$  que considera o tamanho da barra na resistência. Para determinar o fator de  $K_h$  é utilizado a equação I, que determina o coeficiente  $K_h$  para madeiras maciças.

$$K_h \leq \begin{cases} \left(\frac{150}{h}\right)^{0,2} \\ 1,3 \end{cases} \quad \text{Equação I}$$

Onde  $h$  é a altura da peça em milímetro, portanto o coeficiente  $K_h$  para as mesas é 1,27.

Com todos os coeficientes definidos, o próximo passo é determinar os valores de cálculo das propriedades dos materiais. Para isso, foi utilizado a equação II.

$$f_d = \frac{K_{mod}}{\gamma} \times f_k \quad \text{Equação II}$$

Para as mesas, tem-se:

$$\begin{array}{l} \text{Resistência de flexão } (f_{m,d}) \\ \text{Resistência à tração paralela } (f_{t0,d}) \\ \text{Resistência de compressão } (f_{c0,d}) \\ \text{Resistência de cisalhamento } (f_{m,d}) \\ \text{Modulo de Elasticidade } (E_{0d}) \end{array} = \frac{K_{mod}}{\gamma} \times \begin{pmatrix} (f_{m,k}) K_h \\ (f_{t0,k}) K_h \\ (f_{c0,k}) \\ (f_{v,k}) \\ (E_{0,k}) \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 14,07 \\ 8,50 \\ 9,69 \\ 1,85 \\ 6.600 \end{pmatrix} \text{ MPa}$$

De forma análoga são determinadas as resistências de cálculo da alma.

$$\begin{array}{l} \text{Resistência à tração } (f_{tw,d}) \\ \text{Resistência à compressão } (f_{cw,d}) \\ \text{Resistência ao cisalhamento } (f_{vw,d}) \\ \text{Resistência ao cisalhamento (rolamento) } (f_{rw,d}) \end{array} = \frac{K_{mod}}{\gamma} \times \begin{pmatrix} f_{tw,k} \\ f_{cw,k} \\ f_{vw,k} \\ f_{rw,k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,3 \\ 5,30 \\ 2,27 \\ 0,33 \end{pmatrix} \text{ MPa}$$

O módulo de elasticidade ( $E_{w,d}$ ) e de cisalhamento ( $G_{w,d}$ ) são 1.520 MPa e 432 MPa respectivamente.

### 3.3.4 Combinação de carregamento

As cargas de projeto são as cargas permanentes e acidentais, ponderadas por coeficientes. A carga característica permanente estimada foi de 0,19 kN/m distribuída ao longo da viga e 0,90 kN pontual; e a carga acidental característica foi de 0,84 kN/m distribuída. As cargas estão por intervalo de um metro, para determinar a carga total aplicada sobre a área de influência basta multiplicar as respectivas cargas pelo vão da viga, que nesse caso é 5,375 metros, assim temos a carga permanente de 1,92 kN e a carga acidental de 4,54 kN.

Os coeficientes de ponderação das cargas foram obtidos através da NBR 7190/2022, onde foi adotado o coeficiente de ponderação de 1,3 para as cargas permanentes e 1,4 para as acidentais. Geralmente, é realizado o estudo das combinações dos esforços para determinar qual a mais crítica, e assim realizar o dimensionamento para esse esforço, entretanto, como temos apenas a carga permanente e uma carga acidental, a carga de projeto é a soma do produto da carga característica permanente e acidental multiplicadas pelos seus respectivos valores de ponderação. Logo, a carga de projeto é:

$$Fd = 1,3 * 1,92 + 1,4 * 4,54 = 8,85 \text{ kN}$$

O momento de projeto, será:

$$Md = \frac{qd * l^2}{8} + \frac{abPd}{l} = \frac{1,43 * 5,38^2}{8} + \frac{1,68 * 3,70 * 1,17}{5,38} = 6,52 \text{ kNm}$$

### 3.3.5 Seção fictícia

Como habitual, as mesas e a alma são de materiais diferentes, logo as características mecânicas são distintas. Portanto, é conveniente optar por uma seção fictícia, homogeneizando a estrutura. Para efeitos de cálculo, foram considerado as mesas de madeira maciça como o material de referência, sendo assim a espessura da alma é alterada de tal forma que o módulo de elasticidade das mesas poderá ser aplicado para toda a seção transversal. A seguir são calculados os fatores

de larguras efetivas, utilizando as recomendações da Eurocode 5, para o estado limite último e de serviço, nas condições instantânea e finais.

$$\begin{aligned} \mu_{w,sls,inst} &= \frac{E_{w,alma}}{E_{0,flange}} \\ \mu_{w,uls,inst} &= \mu_{w,sls,inst} \\ \text{Fatores de largura efetiva} \quad \mu_{w,sls,fin} &= \frac{E_{w,alma}}{(1+K_{def,alma})} \frac{(1+K_{def,flange})}{E_{0,flange}} \\ \mu_{w,uls,fin} &= \frac{E_{w,alma}}{(1+\Psi 2K_{def,alma})} \frac{(1+\Psi 2K_{def,flange})}{E_{0,flange}} \end{aligned}$$

Logo, os valores dos fatores das larguras efetivas, são:

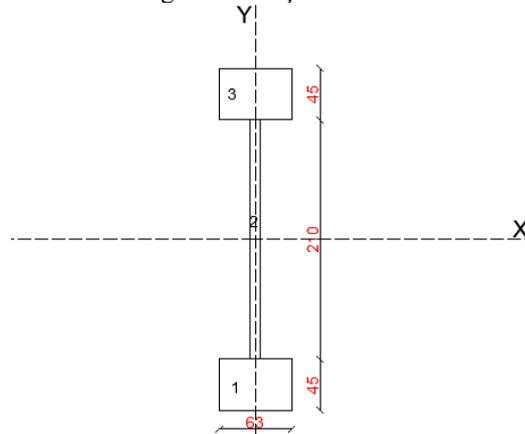
$$\begin{aligned} \mu_{w,sls,inst} &= \frac{3800}{11000} = 0,35 \\ \mu_{w,uls,inst} &= \mu_{w,sls,inst} = 0,35 \\ \mu_{w,sls,fin} &= \frac{E_{w,alma}}{(1+K_{def,alma})} \frac{(1+K_{def,flange})}{E_{0,flange}} = \frac{3800}{(1+1,50)} \frac{(1+0,60)}{11000} = 0,22 \\ \mu_{w,uls,fin} &= \frac{E_{w,alma}}{(1+\Psi 2K_{def,alma})} \frac{(1+\Psi 2K_{def,flange})}{E_{0,flange}} = \frac{3800}{(1+0,2 \times 1,50)} \frac{(1+0,2 \times 0,60)}{11000} = 0,29 \end{aligned}$$

As espessuras efetivas são os produtos dos fatores das larguras efetivas pela largura real, portanto, tem-se:

$$\text{Espessuras fictícias: } \left( \begin{array}{l} bw_{,sls,inst} = \mu_{w,sls,inst} * bw = 3,11 \\ bw_{,sls,fin} = \mu_{w,sls,fin} * bw = 3,11 \\ bw_{,uls,inst} = \mu_{w,uls,inst} * bw = 1,98 \\ bw_{,uls,fin} = \mu_{w,uls,fin} * bw = 2,61 \end{array} \right) \text{ mm}$$

Para todas as espessuras fictícias, instantâneas e finais, são calculadas as inércias equivalentes. Abaixo é demonstrado o cálculo da inércia para a espessura de 3,11 milímetros (figura 39), ou seja, no estado limite de serviço instantâneo:

Figura 39: Seção Fictícia



Fonte: Autor

$$I_{x(3,11)} = 2x \left( \frac{63x45^3}{12} + 63x45x127,50^2 \right) + \frac{3,11x210^3}{12} = 9,5530 * 10^7 mm^4$$

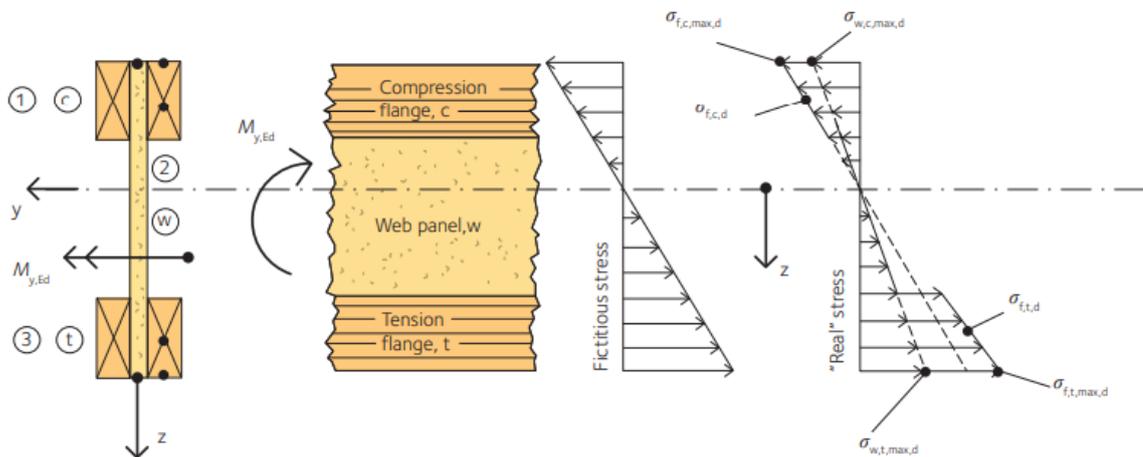
Análogo ao cálculo acima, foram determinadas as inércias fictícias:

$$\text{Momento de inércia: } \left\{ \begin{array}{l} I_{x,sls,inst} = 9,5530 \times 10^7 mm^4 \\ I_{x,uls,inst} = 9,5530 \times 10^7 mm^4 \\ I_{x,sls,fin} = 9,4658 \times 10^7 mm^4 \\ I_{x,uls,fin} = 9,5144 \times 10^7 mm^4 \end{array} \right.$$

### 3.3.6 Resistência à flexão

A seguir serão feitas as verificações das resistências à flexão (figura 40), vale ressaltar que as mesas são verificadas em condições finais, enquanto a alma é verificada em condições instantâneas. Isso ocorre porque as mesas têm melhores propriedades de fluência do que o painel da alma.

Figura 40: Tensões do momento fletor



Fonte: Swedish Wood (2022)

Observando a figura 31 e comparando com as propriedades de resistência dos materiais, pode-se afirmar que as situações mais críticas serão na mesa tracionada, devido ao valor resistente. A seguir serão verificadas as resistências no centro da mesa, na borda da mesa e no topo da alma:

- Tensão na madeira maciça no centro da mesa

$$\sigma_{f,td} = \frac{Mx,d}{I_{x,uls,fin}} * y = \frac{6520}{9,5144 \times 10^7} * \frac{(300 - 45)}{2} = 8,74 MPa$$

Ou seja, a tensão no centro da mesa é superior a resistente ( $f_{t0,d}$ ). Como a resistência a tração é 8,50 MPa e a solicitante foi 10,28 MPa, pode-se concluir que haverá ruptura no centro da mesa, dessa forma será necessário trocar o perfil escolhido inicialmente.

- Tensão na madeira maciça na borda da mesa

$$\sigma_{f,t,max,d} = \frac{M_{x,d}}{I_{x,uls,fin}} * y = \frac{6520}{9,5144 \times 10^7} * \frac{300}{2} = 10,28 \text{ MPa}$$

A tensão na madeira na borda da mesa tem que ser menor que a resistência de flexão ( $f_{m,d}$ ). Como a resistência a flexão é 14,07 MPa e a solicitante foi 10,28 MPa, pode-se concluir que não haverá ruptura na borda da mesa.

- Tensão no painel da alma no topo

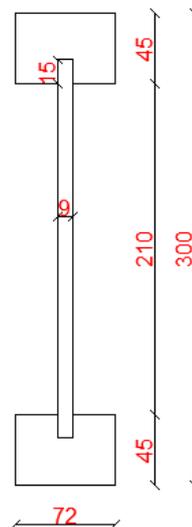
$$\sigma_{w,t,max,d} = \mu_{w,uls,inst} X \frac{M_{x,d}}{I_{x,uls,inst}} * y = 0,3455 * \frac{6520}{9,5144 \times 10^7} * 120 = 2,84 \text{ MPa}$$

A tensão no painel da alma tem que ser menor que a resistência à tração na alma ( $f_{t,w,d}$ ). Como a resistência a tração na placa OSB é 3,30 MPa e a solicitante foi 2,84 MPa, pode-se concluir que não haverá ruptura na borda da alma.

Como analisado, o perfil escolhido terá problemas no centro da mesa, sendo assim, será necessário alterar o perfil. O perfil escolhido para substituir o JJI 300 B+ será o JJI 300 C, que possui as dimensões de acordo com a figura 41.

Figura 41: Perfil JJI 300 C

JJI 300 C [mm]



Fonte: Autor

Como o perfil foi alterado, consequentemente o peso próprio da viga também alterou. Na tabela 09 são apresentadas as novas cargas decorrentes do peso próprio e do revestimento.

Tabela 09: Carga uniformemente distribuído

Carregamento uniformemente distribuído total			
Material	Peso (kN/m <sup>2</sup> )	Largura de influência (m)	carregamento uniformemente distribuído (kN/m)
Viga	-	0,563	0,0418
Placa OSB	0,117		0,0659
Piso laminado	0,065		0,0365
Gesso acartonado	0,088		0,0495
Carga acidental	1,500		0,8445
Total			1,0383

Fonte: Autor

Com a alteração do carregamento, será necessário recalculer a carga e o momento de projeto. A carga de cálculo é a soma da carga pontual e o carregamento distribuídos, majorados pelo coeficiente de ponderação.

$$Fd = 1,3 * 1,94 + 1,4 * 4,54 = 8,88 \text{ KN}$$

$$Md = \frac{qd * l^2}{8} + \frac{abPd}{l} = \frac{1,43 * 5,38^2}{8} + \frac{1,68 * 3,70 * 1,17}{5,38} = 6,53 \text{ KNm}$$

Logo em seguida é recalculado a inercia das seções fictícias.

$$I_{x(3,11)} = 2x \left( \frac{72 * 45^3}{12} + 72 * 45 * 127,50^2 \right) + \frac{3,11 * 210^3}{12} = 1,088 * 10^8 \text{ mm}^4$$

Momento de inercia:  $\left\{ \begin{array}{l} I_{x,sls,inst} = 1,088 * 10^8 \text{ mm}^4 \\ I_{x,uls,inst} = 1,088 * 10^8 \text{ mm}^4 \\ I_{x,sls,fin} = 1,080 * 10^8 \text{ mm}^4 \\ I_{x,uls,fin} = 1,084 * 10^8 \text{ mm}^4 \end{array} \right.$

Agora, recalculando as tensões, temos:

- Tensão na madeira maciça no centro da mesa:

$$\sigma_{f,td} = \frac{M_{x,d}}{I_{x,uls,fin}} x y = \frac{6530}{1,084 * 10^8} * \frac{(300-45)}{2} = 7,68 \text{ MPa} < f_{t0,d} (8,50 \text{ MPa})$$

Ou seja, a tensão no centro do flange é inferior a resistente ( $f_{t0,d}$ ), dessa forma pode-se garantir que não haverá ruptura no centro da mesa.

- Tensão na madeira maciça na borda da mesa:

$$\sigma_{f,t,max,d} = \frac{M_{x,d}}{I_{x,uls,fin}} * y = \frac{6530}{1,084 * 10^8} * \frac{300}{2} = 9,03 \text{ MPa} < f_{m,d} (14,07 \text{ MPa})$$

A tensão na madeira na borda do mesa tem que ser menor que a resistência de flexão ( $f_{m,d}$ ). Como a resistência a flexão é 14,07 MPa e a solicitante foi 9,03 MPa, pode-se concluir que não haverá ruptura na borda da mesa.

- Tensão no painel da alma no topo

$$\sigma_{w,t,max,d} = \mu_{w,uls,inst} * \frac{M_{x,d}}{I_{x,uls,inst}} * y = 0,3455 * \frac{6530}{1,088 * 10^8} * 120 = 2,49 \text{ MPa} < f_{t,w,d} (3,30 \text{ MPa})$$

A tensão no painel da alma tem que ser menor que a resistência à tração na alma ( $f_{t,w,d}$ ). Como a resistência a tração na placa OSB é 3,30 MPa e a solicitante foi 2,49 MPa, podemos concluir que não haverá ruptura na borda da alma.

Assim, conclui-se que a mesa de tração está perfeitamente dimensionada no que diz respeito à ruptura por flexão na mesa.

### 3.3.7 Verificação da resistência à força de cisalhamento

Dois tipos de falhas são possíveis para um painel OSB uniforme sem quaisquer juntas abertas, seja uma falha por cisalhamento puro no painel ou uma falha por flexão fora do plano causada por curvatura por cisalhamento.

De acordo com a norma europeia Eurocode 5, pode-se assumir a ruptura por cisalhamento no painel se  $\frac{hw}{bw} \leq 35$  e falha de flambagem por cisalhamento se  $35 < \frac{hw}{bw} \leq 70$ . Outros tipos de flambagem podem limitar a resistência para valores acima de 70. Os painéis OSB, com esbeltez acima deste limite, raramente são usados em aplicações práticas. Como a altura da alma é 210 mm e 9 mm de espessura, conclui-se que haverá ruptura por cisalhamento puro. A seguir é calculado a resistência à força de cisalhamento desconsiderando a flambagem por cisalhamento.

$$\tau_{v,ed} = \frac{V_d}{A_w} = \frac{V_d}{b_w \times (h_w + h_f)} \leq f_{v,min,d} \quad \text{Equação III}$$

Onde:

$V_d$ : Força de cisalhamento

$b_w$ : largura da alma;

$h_w$ : altura da alma;

$h_f$ : altura da mesa;

$f_{v,min,d}$ : valor mínimo da resistência ao cisalhamento.

A seguir é determinado o valor da força de cisalhamento máximo e logo após é comparado com a tensão de resistência à tração.

$$V_d = 1,3 * \left( \frac{0,1938 * 5,375}{2} \right) + 1,4 * \left( \frac{0,8445 * 5,375}{2} \right) + 1,3 * \left( \frac{0,90 * 3,70}{5,375} \right) = 4,66 \text{ KN}$$

$$V_{rd} = b_w * (h_w + h_f) * f_{v,min,d} = 9 * (210 + 45) * 2,27 = 5,21 \text{ KN}$$

Como a força de cisalhamento resistente de cálculo é menor que a força de cisalhamento máximo de projeto, pode-se concluir que a alma é bem projetada no que diz respeito à sua resistência ao cisalhamento.

### 3.3.8 Resistência ao cisalhamento das conexões mesa- alma

Para uma viga mista é importante que as tensões de cisalhamento no painel da alma possam ser transferidas para as mesas sem qualquer falha da linha de cola. As tensões de cisalhamento a serem transferidas entre as seções podem ser estimadas pela fórmula de cisalhamento tradicional, que se expressa como um critério de falha.

$$\tau_d = \frac{V_d \times \Delta S}{I \times h_{gl}} \leq f_{r,d} \text{ se } h_{gl} \leq \frac{4b_w}{n_{gl}} \quad \text{Equação IV}$$

Ou

$$\tau_d = \frac{V_d \times \Delta S}{I \times h_{gl}} \leq f_{r,d} \left( \frac{n_{gl} \times h_{gl}}{4b_w} \right)^{0,8} \text{ se } h_{gl} > \frac{4b_w}{n_{gl}} \quad \text{Equação V}$$

Onde:

$V_d$ : força de cisalhamento de projeto;

$\Delta S$ : momento estático;

$I_x$ : inércia fictícia;

$h_{gl}$ : profundidade da linha de cola;

$b_w$ : espessura da alma;

$n_{gl}$ : número de peças coladas em ambos os lados;

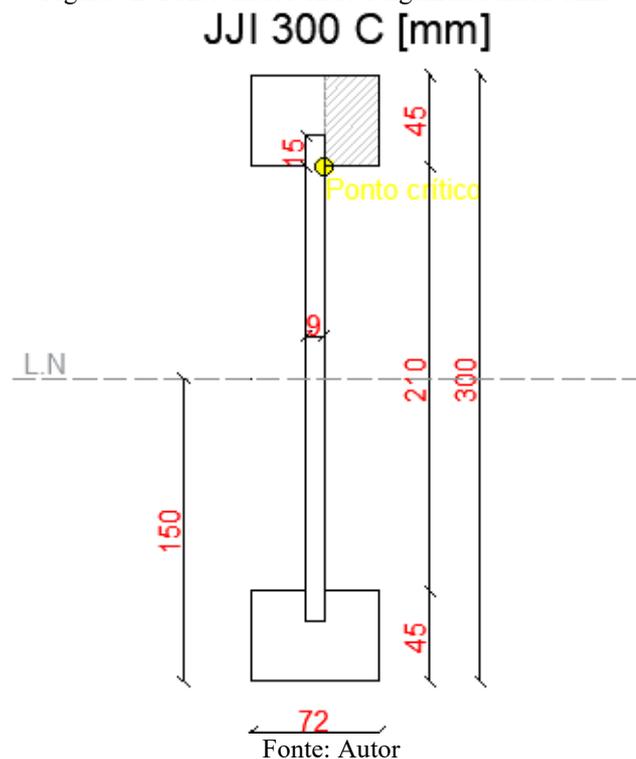
$f_{r,d}$ : resistência ao cisalhamento planar (rolamento).

Em relação às vigas com perfil “I” o número de peças coladas ( $n_{gl}$ ) é 2, ou seja, 2 peças de mesas iguais, são coladas em ambos os lados de um painel de alma. Vale ressaltar que  $b_w$  é a espessura física e não uma espessura fictícia.

Através da figura 32 é possível determinar profundidade da linha de cola ( $h_{gl}$ ), que é 15 milímetros, portanto a fórmula a ser utilizada para calcular a tensão de cisalhamento é a equação IV.

A seguir é calculado o momento estático do ponto mais crítico (figura 42) em relação ao ligamento mesa e alma.

Figura 42: Ponto crítico entre o ligamento mesa-alma.



$$\Delta S = 31,5 * 45 * (105 + 22,50) = 1,81 * 10^5 \text{ mm}^3$$

Neste caso, a inercia  $I_{x,ULS,fin}$  produzirá a maior tensão de cisalhamento. Utilizando a equação IV, é calculada a tensão de cisalhamento:

$$\tau_d = \frac{Vd * \Delta S}{I * hgl} = \frac{4,66 * 1,81 * 10^5}{1,084 * 10^8 * 15} = 0,52 \text{ MPa}$$

Visto que são usadas duas linhas de junção para fazer o ligamento ente a alma e a mesa, a cola por metro de comprimento de viga em cada linha de junção deve ser resistente o bastante para resistir à metade de tensão de cisalhamento, portanto,  $\tau_d$  é 0,26 MPa. A resistência ao cisalhamento planar (rolamento) é 0,33 MPa, portanto, conclui-se que a linha de cola tem força suficiente.

### 3.3.9 Verificação da flecha

A flecha deve ser calculada para a combinação característica, ou seja:

$$\Sigma Gk + \Sigma(\Psi_2 * Qk) \quad \text{Equação VI}$$

Recapitulando alguns dados importantes:

Peso próprio:  $Gk = 0,1938 \text{ kN/m}$  e  $0,90 \text{ kN}$  da parede não estrutural

Peso acidental:  $Qk = 0,8445 \text{ kN/m}$

$\Psi_2 = 0,20$  (sem grandes concentrações de equipamentos e pessoal)

$I_{x,SLS,inst} = 1,088 \times 10^8$

$I_{x,SLS,fin} = 1,080 \times 10^8$

Área da alma total:  $b_w \times h_w = 2,16 \times 10^3 \text{ mm}^2$

A seguir será realizado o cálculo das flechas proveniente da flexão e cisalhamento, vale ressaltar que ambas são calculadas separadas, porque os painéis da alma são muito mais propensos à fluência do que as mesas que atuam na flexão.

- Flecha instantânea de flexão causada pela carga permanente

$$Wg, ben, SLS, int = \frac{5 \times Gser \times l^4}{384 \times Eo, mean \times Ix, SLS, inst} + \frac{Pb}{3 \times Eo, mean \times Ix, SLS, inst \times l} \times \sqrt{\left(\frac{l^2 - b^2}{3}\right)^3} \quad \text{Equação VII}$$

$$Wg, ben, SLS, int = \frac{5 \times 0,1938 \times 5375^4}{384 \times 11000 \times 1,088 \times 10^8} + \frac{900 \times 1675}{3 \times 11000 \times 1,088 \times 10^8 \times 5375} \times \sqrt{\left(\frac{5375^2 - 1675^2}{3}\right)^3}$$

$$Wg, ben, SLS, int = 1,76 + 2,03 = 3,76 \text{ mm}$$

$$Wg, ben, SLS, infin = \frac{5 \times Gser \times l^4}{384 \times Eo, mean \times Ix, SLS, fin} + \frac{Pb}{3 \times Eo, mean \times Ix, SLS, inst} \times \sqrt{\left(\frac{l^2 - b^2}{3}\right)^3} \quad \text{Equação VIII}$$

$$Wg, ben, SLS, infin = \frac{5 \times 0,1938 \times 5375^4}{384 \times 11000 \times 1,080 \times 10^8} + \frac{900 \times 1675}{3 \times 11000 \times 1,080 \times 10^8 \times 5375} \times \sqrt{\left(\frac{5375^2 - 1675^2}{3}\right)^3}$$

$$Wg, ben, SLS, infin = 1,77 + 2,02 = 3,78 \text{ mm}$$

- Flecha instantânea de cisalhamento causada pela carga permanente

$$Wg, shear, SLS, int = \frac{Gser \times l^2}{8 \times Gw, mean \times Aw} = \frac{0,1938 \times 5375^2}{8 \times 1080 \times 2,16 \times 10^3} = 0,30 \text{ mm} \quad \text{Equação IX}$$

$$Wg, shear, SLS, infin = Wg, shear, SLS, int = 0,30 \text{ mm}$$

- Flecha instantânea de flexão causada pela carga acidental

$$Wq, ben, SLS, int = \frac{5 \times Qser \times l^4}{384 \times Eo, mean \times Ix, SLS, inst} = \frac{5 \times 0,8445 \times 5375^4}{384 \times 11000 \times 1,088 \times 10^8} = 7,67 \text{ mm}$$

$$Wq, ben, SLS, infin = \frac{5 \times Qser \times l^4}{384 \times Eo, mean \times Ix, SLS, fin} = \frac{5 \times 0,8445 \times 5375^4}{384 \times 11000 \times 1,080 \times 10^8} = 7,73 \text{ mm}$$

- Flecha instantânea de cisalhamento causada pela carga acidental

$$Wq, shear, SLS, int = \frac{Qser \times l^2}{8 \times Gw, mean \times Aw} = \frac{0,8445 \times 5375^2}{8 \times 1080 \times 2,16 \times 10^3} = 1,31 \text{ mm}$$

$$Wq, shear, SLS, infin = Wq, shear, SLS, int = 1,31 \text{ mm}$$

Com as flechas calculadas, é determinado a flecha máxima instantaneamente e em estado final.

Total instantâneo flecha de flexão:

$$Wbend, inst = Wg, ben, SLS, int + Wq, ben, SLS, int = 3,76 + 7,67 = 11,43 \text{ mm}$$

Total instantâneo flecha de cisalhamento:

$$W_{shear, inst} = W_{g, shear, SLS, int} + W_{q, shear, SLS, int} = 0,30 + 1,31 = 1,61 \text{ mm}$$

Total instantâneo da flecha:

$$W_{inst} = W_{bend, inst} + W_{shear, inst} = 11,43 + 1,61 = 13,04 \text{ mm}$$

Como  $W_{inst}$  é menor que  $\frac{l}{300}$  (17,92), portando a flecha instantânea está dentro do limite permitido.

A seguir é realizado o cálculo para determinar as flechas finais:

- Flecha final de flexão de carga permanente:

$$W_{g, ben, SLS, fin} = W_{g, ben, SLS, in fin} \times (1 + \Psi 2K_{def}) = 3,78 \times (1 + 0,2 \times 0,60) = 4,23 \text{ mm}$$

- Flecha final de cisalhamento de carga permanente:

$$W_{g, shear, SLS, fin} = W_{g, shear, SLS, in fin} \times (1 + \Psi 2K_{def}) = 0,30 \times (1 + 0,2 \times 1,5) = 0,39 \text{ mm}$$

- Flecha final de flexão de carga acidental:

$$W_{q, ben, SLS, fin} = W_{q, ben, SLS, in fin} \times (1 + \Psi 2K_{def}) = 7,73 \times (1 + 0,2 \times 0,6) = 8,66 \text{ mm}$$

- Flecha final de cisalhamento de carga acidental:

$$W_{q, shear, SLS, fin} = W_{q, shear, SLS, in fin} \times (1 + \Psi 2K_{def}) = 1,31 \times (1 + 0,2 \times 1,5) = 1,70 \text{ mm}$$

Portanto, assim tem-se:

Flecha final de flexão:

$$W_{bend, fin} = W_{g, ben, SLS, fin} + W_{q, ben, SLS, fin} = 4,23 + 8,66 = 12,89 \text{ mm}$$

Flecha final de cisalhamento:

$$W_{shear, fin} = W_{g, shear, SLS, fin} + W_{q, shear, SLS, fin} = 0,39 + 1,70 = 2,09 \text{ mm}$$

Flecha final total:

$$W_{fin} = W_{bend, fin} + W_{shear, fin} = 12,89 + 2,09 = 14,98 \text{ mm}$$

Como  $W_{fin}$  é menor que  $\frac{l}{200}$  (26,88), portando a flexa instantânea está dentro do limite permitido.

### 3.3.10 Resultado do dimensionamento da estrutura de piso com *I-Joists*

De maneira análoga à seção 3.3, todas as vigas foram dimensionadas. Para isso, selecionou-se a viga mais crítica de cada cômodo e realizou-se as verificações. Com o objetivo de a altura da estrutura de piso ser uniforme, foi adotado todas as vigas com altura de 300 mm, variando apenas a largura da mesa. Na tabela 10 é apresentado o resultado do dimensionamento.

Tabela 10: Resultado do dimensionamento

Dimensionamento da estrutura de piso				
Cômodo	Comprimento da viga (m)	Espaçamento entre eixos (m)	Perfil calculado	Perfil adotado
Garagem	5,38	0,56	JJI 300 C	JJI 300 C
Sala de estar	4,95	0,56	JJI 300 C	JJI 300 C
Cozinha	4,4	0,56	JJI 300 B+	JJI 300 C
Despensa	2,15	0,56	JJI 300 A+	JJI 300 A+
Área Gourmet	5,38	0,56	JJI 300 C	JJI 300 C
Área de serviço	3,41	0,56	JJI 300 A+	JJI 300 A+
Banheiro externo	1,85	0,56	JJI 300 A+	JJI 300 A+

Fonte: Autor

Os perfis ainda podem ser mais otimizados, para isso deve-se realizar combinações a fim de obter a melhor solução, como por exemplo, diminuir o espaçamento entre as vigas com a intenção de obter perfis mais econômicos. Outro fator que é bastante influente na otimização dos resultados é a escolha do fabricante, pois há várias combinações que o produtor pode optar a fim de obter resultados mais satisfatórios. Como por exemplo, a maioria dos fabricantes optam por fabricar as mesas com madeira LVL, assim proporcionando mais resistência ao perfil, enquanto o peso do material diminui.

### 3.4 Dimensionamento da estrutura de piso com vigas retangulares

A seguir a mesma viga dimensionada no t3pico 3.3, ser3a novamente dimensionada, entretanto agora ser3a adotado o perfil retangular de madeira maci3a, a fim de posteriormente realizar as compara33es entre as vigas “I” e as vigas tradicionais de se33o retangular.

#### 3.4.1 Determina33o do carregamento

No pr3e-dimensionamento foi estipulado que a viga em madeira seria de classe C24 e de se33o 5 cm por 25 cm, por3m tal se33o n3o passou nas verifica33es, sendo assim, ser3a utilizada a madeira *Pinus Elliottii* de classe C24 com 5 cm de largura e 30 cm de altura, a qual possui peso espec3fico m3dio de 0,50 g/cm<sup>3</sup>, ou seja, o peso pr3prio desse perfil 3 de 7,50 kg/m, equivalente a 0,075 kN/m.

O peso dos revestimentos 3 o mesmo calculado no item 3.3.1. Na tabela 11 consta o carregamento uniformemente distribuído total da viga.

Tabela 11: Carregamento sobre a viga.

Carregamento uniformemente distribuído total			
Material	Peso (kN/m <sup>2</sup> )	Largura de influ3ncia (m)	carregamento uniformemente distribuído (kN/m)
Viga	-	0,563	0,0750
Placa OSB	0,117		0,0659
Piso laminado	0,065		0,0365
Gesso acartonado	0,088		0,0495
Carga acidental	1,500		0,8445
Total			1,0714

Fonte: Autor.

#### 3.4.2 Propriedades mec3nicas da viga

A madeira utilizada 3 de classe C24, portanto utilizando a norma brasileira NBR7190:2022, pode-se determinar as propriedades mec3nicas da viga.

Resist3ncia 3 tra33o paralela ( $f_{t0k}$ )	$\left( \begin{array}{c} 14,0 \text{ MPa} \\ 24,0 \text{ MPa} \\ 4,0 \text{ MPa} \\ 11.000 \text{ MPa} \end{array} \right)$
Resist3ncia de compress3o ( $f_{c0k}$ )	
Resist3ncia de cisalhamento ( $f_{vk}$ )	
Modulo de Elasticidade ( $E_{0,m}$ )	

### 3.4.3 Valores de projeto das propriedades do material

Para determinar os valores de cálculo das propriedades do material foi utilizado a norma brasileira de madeira, sendo assim, o primeiro passo é determinar o valor de  $K_{mod}$  e o coeficiente de ponderação da resistência.

O  $K_{mod}$  é obtido pelo produto dois coeficientes parciais de modificação,  $K_{mod,1}$ , e o  $K_{mod,2}$ .

$K_{mod,1}$ : leva em conta a classe de carregamento e o tipo de material empregado;

$K_{mod,2}$ : leva em conta a classe de umidade e o tipo de material empregado.

Analisando os fatores necessários, foi determinado os coeficientes parciais de modificação. O  $K_{mod,1}$  vale 0,60 (carregamento permanente e madeira serrada) e o  $K_{mod,2}$  é 1,0 (classe de umidade I e madeira serrada).

$$K_{mod} = 0,6 * 1,0 = 0,60$$

Outro coeficiente que deve ser determinado é o coeficiente de ponderação da resistência para estados limites últimos, na norma europeia o fator de ponderação da resistência é baseado no tipo de madeira, entretanto, na norma brasileira, tal coeficiente é determinado de acordo com o tipo tensão, dessa forma tem-se:

$\gamma_{wc} = 1,4$  para estados limites últimos decorrentes de tensões de compressão paralela às fibras;

$\gamma_{wt} = 1,8$  para estados limites últimos decorrentes de tensões de tração paralela às fibras;

$\gamma_{wc} = 1,8$  para estados limites últimos decorrentes de tensões de cisalhamento paralelo às fibras.

Com os fatores determinados, o próximo passo é determinar os valores de cálculo.

$$\begin{array}{l}
 \text{Resistência à tração paralela } (f_{t,0,d}) \\
 \text{Resistência de compressão } (f_{c,0,d}) \\
 \text{Resistência de cisalhamento } (f_{v,d}) \\
 \text{Modulo de Elasticidade } (E_{0,d})
 \end{array}
 = \frac{K_{mod}}{\gamma} X
 \begin{array}{c}
 (f_{t,k}) \\
 (f_{c0k}) \\
 (f_{vk}) \\
 (E_{0k}) \gamma
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 4,67 \\
 10,29 \\
 1,33 \\
 6.600
 \end{array}
 \text{ MPa}$$

### 3.4.4 Combinação de carregamento

A carga característica permanente estimada foi de 0,23 kN/m distribuída ao longo da viga e 0,90 kN pontual; e a carga acidental característica foi de 0,84 kN/m distribuída. As cargas estão por intervalo de um metro, para determinar a carga total aplicada sobre a área de influência basta multiplicar as respectivas cargas pelo vão da viga, que nesse caso é 5,375 metros, assim tem-se a carga permanente de 2,12 kN e a carga acidental de 4,54 kN.

Os coeficientes de ponderação das cargas foram obtidos através da NBR 7190/2022, onde foi adotado o coeficiente de ponderação de 1,3 para as cargas permanentes e 1,4 para as acidentais. Geralmente, é realizado o estudo das combinações dos esforços para determinar qual a mais crítica, e assim realizar o dimensionamento para esse esforço, entretanto, como tem-se apenas a carga permanente e uma carga acidental, a carga de projeto é a soma do produto da carga característica permanente e acidental multiplicadas pelos seus respectivos valores de ponderação. Logo, a carga de projeto é:

$$Fd = 1,3 * 2,12 + 1,4 * 4,54 = 9,11 \text{ kN}$$

O momento de projeto, será:

$$Md = \frac{qd * l^2}{8} + \frac{abPd}{l} = \frac{1,48 * 5,38^2}{8} + \frac{1,68 * 3,70 * 1,17}{5,38} = 6,68 \text{ kNm}$$

### 3.4.5 Verificação das resistências

- Tensão normal

$$\sigma_{f,td} = \frac{M_{x,d}}{I_x} * y = \frac{6680}{1,12 * 10^8} * \frac{300}{2} = 8,91 \text{ MPa}$$

A tensão normal tem que ser menor que a resistência de compressão ( $f_{cd}$ ). Como a resistência a compressão é 10,29 MPa e a solicitante foi 8,91 MPa, pode-se concluir que não haverá ruptura.

- Tensão tangencial

A tensão tangencial é calculada pela fórmula abaixo:

$$\tau d = \frac{Vd * S}{b * Ix}$$

A seguir é determinado o valor da força de cisalhamento máximo e o momento estático:

$$Vd = 1,3 x \left(\frac{0,23 * 5,375}{2}\right) + 1,4 x \left(\frac{0,8445 * 5,375}{2}\right) + 1,3 x \left(\frac{0,90 * 3,70}{5,375}\right) = 4,78 \text{ kN}$$

$$S = 50 * \frac{300}{2} * \frac{300}{4} = 5,63 x 10^5 \text{ mm}^3$$

Portanto, a tensão tangencial solicitante é:

$$\tau d = \frac{Vd * S}{b * Ix} = \frac{4,78 * 5,63 * 10^5}{50 * 1,12 * 10^8} = 0,47 \text{ MPa}$$

Como a força de cisalhamento resistente de cálculo é maior que a força de cisalhamento máximo de projeto, pode-se concluir que a viga é bem projetada no que diz respeito à sua resistência ao cisalhamento.

- Estabilidade lateral

Para as vigas de seção transversal retangular, tem-se:

$$\frac{L1}{b} \leq \frac{Eco,ef}{\beta m x fcd}$$

Onde:

L1: distância de contraventamento (5,375 m);

E<sub>co,ef</sub>: Módulo de elasticidade efetivo (6.600 MPa);

B<sub>M</sub>: Coeficiente de correção tabelado de acordo com a altura e largura da peça (23,10);

f<sub>cd</sub>: resistência de compressão (10,29 MPa).

Assim, tem-se:

$$107,50 \leq 27,77 \text{ não OK}$$

Portanto, será necessário introduzir dois contraventamentos no vão da viga, de forma que a distância entre os contraventamentos seja de 1,34 metros.

## 4 COMPARAÇÃO ENTRE A SEÇÃO “I” E RETANGULAR

A seguir será realizado algumas comparações entre a *I-Joist* e a viga retangular de madeira, a fim de constatar algumas vantagens do perfil otimizado.

### 4.1 Orçamento

No Brasil as *I-Joists* ainda não são produzidas, com isso há uma dificuldade em realizar um orçamento válido em âmbito nacional. Para ter uma noção do valor de comercialização das *I-Joists*, foi realizado um estudo nos catálogos americanos, no qual foi possível perceber que os valores são bastantes divergentes entre cada fabricante, pois cada fabricante escolhem os tipos de materiais, o tipo de ligação entre os materiais e o custo necessário para a produção.

Neste trabalho foi utilizado a viga I composta de OSB na alma e de madeira maciça nas mesas, essa combinação é a mais econômica, quando comparada com outras combinações que proporcionam mais resistência e benefícios. Através de estudos, foi analisado que as vigas I composta com madeira maciça e placa de OSB custam entorno de R\$ 52,80 reais por metro de viga.

No Brasil, a madeira é muito utilizada na estrutura de telhado, principalmente a madeira *Pinus Elliottii*, a qual pode ser encontrada no mercado com diversas dimensões. A viga 5 x 30 cm aparelhada, pode ser encontrado no mercado brasileiro entorno de R\$ 62,90 por metro de viga. Assim sendo, o perfil “I” é mais econômico, quando comparado com a viga retangular, devido a otimização de tal perfil quando comparado com o perfil tradicional.

Vários fatores influenciam no valor final do produto, sendo assim, caso a produção da viga *I-Joist* seja iniciada Brasil, o valor de comercialização será diferente do valor que tal material é comercializado em outros países, isso provocará um tempo maior para que as vigas em madeira em “I” sejam mais baratas que o perfil tradicional, principalmente por ser um produto “inovador”.

## 4.2 Peso da estrutura de piso

Na tabela 12 é apresentado o peso da estrutura de piso, desconsiderando as vigas de cintamento, utilizando os perfis de seção “I”.

Tabela 12: Peso aproximado da estrutura do piso

Peso aproximado da estrutura de piso				
Cômodo	Comprimento da viga (m)	Perfil adotado	Quantidade de vigas	Peso total (Kg)
Garagem	5,38	JJI 300 C	11	247,37
Sala de estar	4,95	JJI 300 C	11	227,60
Cozinha	4,4	JJI 300 C	13	239,10
Despensa	2,15	JJI 300 A+	7	47,71
Área Gourmet	5,38	JJI 300 C	13	292,35
Área de serviço	3,41	JJI 300 A+	8	86,48
Banheiro externo	1,85	JJI 300 A+	7	41,05
Total				1.181,66

Fonte: Autor

Em seguida, na tabela 13 é apresentado o peso da estrutura de piso, considerando a estrutura com vigas retangulares em madeira.

Tabela 13: Peso aproximado da estrutura do piso – Vigas retangulares

Peso aproximado da estrutura de piso - Vigas retangulares				
Cômodo	Comprimento da viga (m)	Perfil adotado (cm)	Quantidade de vigas	Peso total (Kg)
Garagem	5,38	5 x 30	11	443,85
Sala de estar	4,95	5 x 30	11	408,38
Cozinha	4,4	5 x 30	13	429,00
Despensa	2,15	5x 20	7	75,25
Área Gourmet	5,38	5 x 30	13	524,55
Área de serviço	3,41	5 x 20	8	136,40
Banheiro	1,85	5 x 20	7	64,75
Total				2.082,18

Fonte: Autor

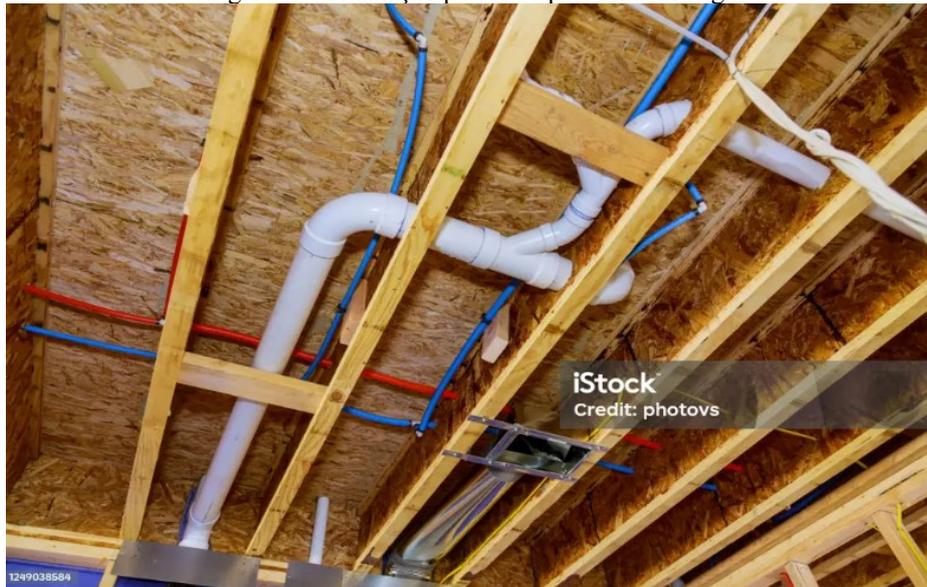
Analisando as tabelas 12 e 13, pode-se verificar que o peso da estrutura de piso com *I-Joists* é 57% menor quando comparado com a estrutura de piso com vigas retangulares, sendo assim foi constatado que o peso da estrutura de piso de madeira com vigas em perfil “I” é bem inferior quando comparado com a seção transversal retangular. Por isso, a estrutura de piso com *I-Joist* é uma excelente escolha para as edificações em *Wood Frame*, pois, a *I-Beam* proporciona inúmeras vantagens como: facilidade na execução da obra, diminuição do tempo de execução, capacidade de suportar maiores cargas, além de ser um produto mais confiável, por conta do seu processo de fabricação.

A estrutura ser mais leve proporciona algumas vantagens, principalmente pela facilidade de movimentação no canteiro de obra que a estrutura terá, e o requerimento de mão de obra, visto que quando mais pesada a estrutura mais pessoas e equipamentos serão necessários, sendo assim, as *I-Joists* são mais vantajosas quando comparada com o perfil retangular.

### 4.3 Passagem de tubulações

A *I-Joist* também possui outra vantagem, além das já citadas, que é a facilidade em abrir orifícios para a passagem de tubulações. Diferente do perfil retangular, o perfil I possui mais facilidade em abrir orifícios, especialmente pela alma ser de um material mais fácil de perfurar e de menor espessura. Nas figuras 43 e 44 são representados os orifícios para a passagem de tubulações

Figura 43: Tubulação passando pela alma da viga



Fonte: Istock (2019)

Figura 44: Tubulação passando pela alma da viga



Fonte: Istock (2019)

Nos catálogos dos fabricantes são apresentados os critérios e verificações necessárias para a abertura desses orifícios, para que a perfil não seja comprometido após a perfusão.

## 5 CONCLUSÃO

Como apresentado no decorrer deste trabalho, a madeira é vastamente utilizada em outros países, como componente estrutural, em decorrência das numerosas vantagens que esse tipo de material proporciona, além da abundância no meio ambiente. Em decorrência, os estudos relacionados a esse material vêm aumentando cada vez mais, proporcionando evoluções no uso desse material na construção civil.

No Brasil, a madeira está longe de ganhar o seu devido protagonismo, pois, ainda há muito preconceito relacionado a esse material no ramo da construção civil, devido o material sempre ser relacionado a fragilidade e ideias errôneas em relação ao seu desempenho.

Nos últimos anos a aplicação da madeira no Brasil vem aumentando consideravelmente, tal material está sendo aplicado para casos mais complexos, além da atualização da norma brasileira de madeira em 2022. Embora a utilização da madeira no Brasil tenha crescido nos últimos anos, ainda a maior utilidade da madeira em âmbito nacional atualmente é no emprego em coberturas.

Neste trabalho foi apresentado o perfil “I”, que possui muitas vantagens quando comparado com outros perfis de madeira, por conta, principalmente, do seu formato. As *I-Joists* podem facilmente serem utilizadas no Brasil, porém nesse caso, é imprescindível o conhecimentos das normas americanas e europeia, visto que na norma brasileira não há informações suficientes. O processo de dimensionamento é bem intuitivo para quem já tem conhecimento em dimensionamento e na teoria do uso da madeira na construção civil, o que facilita o entendimento das verificações necessárias apresentadas na norma europeia para dimensionar tais perfis.

No decorrer deste trabalho, foram apresentados vários benefícios do perfil “I”, quando comparado com o perfil retangular, desde a facilidade em movimentação até o custo final do produto. Além disso, devido as várias vantagens que a seção “I” proporciona, o preço do produto não é o único fator que deve ser levado em consideração, ou seja, mesmo que se a *I-*

*Joist* fosse mais caro que o perfil retangular ainda assim seria uma boa opção para diversas situações em decorrência das outras vantagens que tal perfil proporciona.

Como sugestão de continuidade a esse trabalho, propõe-se a fabricação de uma *I-Joist* nacional, e, posteriormente, a realização dos ensaios de resistência a tração, à flexão e ao cisalhamento, a fim de comparar os valores teóricos contido na norma europeia e os obtidos no ensaio nacional, com o objetivo de garantir a possibilidade do uso da norma europeia para dimensionamento das “*I-Joist*” no Brasil.

## REFERÊNCIAS

APA. Engineered wood. Disponível em: <https://www.apawood.org/>. Acesso em: 02 nov, 2023.

ARCHDAILY. Madeira Laminada Cruzada: o que é e como utilizá-la. Disponível em: <https://artesanourbanismo.com.br/>. Acesso em: 30 out. 2023.

ARTESANO. Por que a madeira engenheirada é melhor para o meio ambiente? Disponível em: <https://artesanourbanismo.com.br/>. Acesso em: 30 out. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BUILDING AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY. The Evolution of Engineered wood i-joists. Disponível em: <https://bct.eco.umass.edu/>. Acesso em: 04 nov. 2023.

CARPINTERIA INTELIGENTE. Madeira laminada colada: Uma breve história. Disponível em: <https://carpinteria.com.br>. Acesso em: 31 out. 2023.

CARPINTERIA INTELIGENTE. Processo de produção da MLC. Disponível em: <https://carpinteria.com.br>. Acesso em: 31 out. 2023.

CARPINTERIA INTELIGENTE. Shopping Iguatemi em Fortaleza. Disponível em: <https://carpinteria.com.br>. Acesso em: 31 out. 2023.

CELRE. O que é madeira engenheirada e quais são suas vantagens na construção. Disponível em: <https://celere-ce.com.br>. Acesso em: 30 out. 2023.

CONSTRUCTION CANADÁ. Pisos com estrutura de madeira além do código: a importância de equilibrar tendências de design, escolhas de produtos e métodos de instalação. Disponível em: <https://www.constructioncanada.net>. Acesso em: 21 nov. 2023.

GHISLENI, C. O que é madeira engenheirada?. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/>. Acesso em: 30 out. 2023.

GODONOU, P. **Design of timber estruturas:** Examples. Stockholm: Swedish Wood, 2022.

GODONOU, P. **Design of timber estruturas:** Rules and formulas according to Eurocode 5. Stockholm: Swedish Wood, 2022.

GODONOU, P. **Design of timber estruturas:** Structural aspects of timber construction. Stockholm: Swedish Wood, 2022.

ISTOCK. Resíduos de tubos de PVC sistema de drenagem dentro do edifício, tubulação no teto. Disponível em: <https://www.istockphoto.com>. Acesso em: 21 nov. 2032.

JÚNIOR, C.C.; BRAZOLIN, S. **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais.** São Paulo: IBRRACON, 2010.

JÚNIOR, C.C; LAHR, F.A.R; DIAS, A.A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira.** Barueri: Manole, 2003.

JÚNIOR, C.C; LAHR, F.A.R; DIAS, A.A. **Estruturas de Madeira:** Projeto dimensionamento e exemplo de cálculo. Barueri: Elsevier, 2019.

LÍDER CIVIL. O que é uma viga de piso? 3 Tipos de vigas de piso. Disponível em: <https://www.civillead.com>. Acesso em: 21 nov. 2023.

MADEIRA TOTAL. Primeiro edifício multipisos em madeira do Brasil. Disponível em: <https://www.madeiratotal.com.br/>. Acesso em: 01 nov. 2023.

MCR SAFETY. Tipos de molduras de construção e luvas de molduras. Disponível em: <https://www.mcrcsafety.com>. Acesso em: 21 nov. 2023.

MIGLIANI, A. O que é madeira laminada colada (MLC ou Glulam). **ArchDaily**, Chile, 2019.

PEDROSA, A.L. **Performance de vigas “I” constituídas por flanges de PLP e almas de compensado de Pinus taeda L. E Eucalyptus dunnii Maiden, e alma OSB de Pinus spp.**

Dissertação (Mestrado) – Ciências Florestais, Universidade Federal do Paraná, 2003.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

PORTAL DA MADEIRA. Tipos de componentes da viga I. Disponível em: <https://portaldamadeira.blogspot.com>. Acesso em 04 nov. 2023.

SANTOS, R.C. **Estruturas de madeira e estruturas metálicas**. Londrina: Educacional, 2019.

SEBRAE. Madeira engenheirada: conheça a nova tendência da construção civil. Disponível em: <https://sebrae.com.br>. Acesso em: 31 out. 2023.

URBEM. Conheça o processo de fabricação do Mass Timber. Disponível em: <https://urbembr.com.br>. Acesso em: 02 nov. 2023.

WESBEAM. How LVL I-Joists are made. Disponível em: <https://wesbeam.com/>. Acesso em: 02 nov. 2023.