

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

BRUNO LEONARDO NUNES

PROJETO ESTRUTURAL DA CASA DA ACOLHIDA DO HU-UEPG: ADAPTAÇÃO
DA ESTRUTURA PRINCIPAL DE CONCRETO ARMADO PARA MADEIRA, DE
ACORDO COM A NOVA NORMA ABNT NBR 7190:2022

PONTA GROSSA
2022

BRUNO LEONARDO NUNES

PROJETO ESTRUTURAL DA CASA DA ACOLHIDA DO HU-UEPG:
adaptação da estrutura principal de concreto armado para madeira, de
acordo com a nova norma ABNT NBR 7190:2022

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil pela Universidade Estadual de
Ponta Grossa.
Orientadora: Prof.^a Me. Leticia Col Debella
Santos

PONTA GROSSA

2022

BRUNO LEONARDO NUNES

PROJETO ESTRUTURAL DA CASA DA ACOLHIDA DO HU-UEPG:
adaptação da estrutura principal de concreto armado para madeira, de
acordo com a nova norma ABNT NBR 7190:2022

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como requisito para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de
Ponta Grossa

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a Me. Leticia Col Debella Santos
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof.^a Me. Fernanda Brekailo
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. Dr. Sérgio Luiz Schulz
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Ponta Grossa, 20 de dezembro de 2022

AGRADECIMENTOS

À Prof.^a Me. Leticia Col Debella Santos, pela contribuição nas sugestões e ideias durante a orientação deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Aos meus colegas de curso, em especial à Alexandre Pool Skovronski, Gustavo Varela Morche e Matheus Alves Carneiro, pela amizade e inspiração que incentivou no desenvolvimento deste trabalho.

À todos que contribuíram direta ou indiretamente à realização desta pesquisa.

RESUMO

A utilização de madeira em construções não tem grande destaque frente às construções convencionais de concreto armado e alvenaria. Esse fato tem potencial de ser invertido, pois a madeira possui vantagens que às vezes não são consideradas para o desenvolvimento de um projeto, por falta de abordagem técnica e teórica do material. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo a adaptação de um projeto em concreto armado para madeira. A adaptação se deu com duas espécies de madeira de destaque em Ponta Grossa. Estas foram escolhidas com base em pesquisa de campo, e dimensionadas conforme as premissas da norma recém atualizada ABNT NBR 7190:2022. Ao final do dimensionamento, determinou-se a possibilidade de uso de pilares de seção 10 x 10 cm, para ambas as espécies de madeira, contudo, vigas de 5 x 15 cm para madeira de pinus, e de 5 x 10 cm para madeira de eucalipto.

Palavras-chave: Madeira. Estrutura. NBR 7190:2022.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Gráfico geral de desempenho x vida útil	16
Figura 2 – Estrutura MLC do Metropol Parasol	20
Figura 3 – Vista panorâmica do Metropol Parasol	20
Figura 4 – Fachada do Pompidou de Metz.....	21
Figura 5 – Malha de treliças em MLC.....	21
Figura 6 – Fachada em execução do Pavilhão Francês.....	22
Figura 7 – Estrutura do Pavilhão Francês	22
Figura 8 – Fachada do edifício Hoho	23
Figura 9 – Fachada do edifício Mjøstårnet	23
Figura 10 – Sistema Trä8 de vigas e pilares de madeira.....	24
Figura 11 – Superestrutura do Tamedia Office Building	25
Figura 12 – a) estrutura da bucha para o vínculo das peças do edifício; b) conectores das peças estruturais do edifício	25
Figura 13 – Fachada do edifício The Tree.....	26
Figura 14 – Expodach in Hanover	26
Figura 15 – Estádio Altusried	27
Figura 16 – Fachada da casa do Hélio Olga	28
Figura 17 – Hotel Nova Friburgo	28
Figura 18 – Residência elaborada pelo escritório O NORTE.....	29
Figura 19 – Fluxograma dos procedimentos empregados na metodologia.....	35
Figura 20 – Planta baixa da casa da acolhida	36
Figura 21 – Cortes da casa da acolhida	37
Figura 22 – Representação 3D frontal da casa da acolhida	37
Figura 23 – Representação 3D lateral esquerda da casa da acolhida.....	38

Figura 24 – Representação 3D lateral direita da casa da acolhida.....	38
Figura 25 – Representação 3D posterior da casa da acolhida	38
Figura 26 – Captura de tela do AutoCAD com áreas de influência dos pilares.....	44
Figura 27 – Captura de tela do AutoCAD com áreas de influência dos pilares.....	46
Figura 28 – Configuração deformada da viga, com apresentação do carregamento em kN/m e reações de apoio em kN	49
Figura 29 – Diagrama de esforço cortante da viga V1 no programa ftool, em kN.....	49
Figura 30 – Diagrama de momento fletor da viga V1 no programa ftool, em kN·m...	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de energia para produção de diferentes materiais.....	14
Tabela 2 – Relação de madeiras recomendadas por cada empresa.....	39
Tabela 3 – Classificação mecânica das classes para madeira de pinus	40
Tabela 4 – Resumo dos valores obtidos na caracterização da madeira de pinus.....	41
Tabela 5 – Resumo dos valores obtidos na caracterização da madeira de eucalipto	42
Tabela 6 – Relação de área de influência por pilar	45
Tabela 7 – Relação de área de influência por viga.....	47
Tabela 8 – Relação de esforço cortante, momento fletor e reação de apoio para as vigas de Pinus.....	51
Tabela 9 - Relação do valor de flecha com o deslocamento limite em cada viga	52
Tabela 10 – Relação de valores obtidos para cada verificação com seção de viga de 5 x 15 cm e de pilar de 10 x 10 cm para a madeira de pinus.....	56
Tabela 11 – Relação de esforço cortante, momento fletor e reação de apoio para as vigas de Eucalipto	57
Tabela 12 – Relação de valores obtidos para cada verificação com seção de viga de 5 x 10 cm e de pilar de 10 x 10 cm para a madeira de eucalipto	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores de $K_{\text{mod}1}$	31
Quadro 2 – Valores de $K_{\text{mod}2}$	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO GERAL.....	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 USO ATUAL A NÍVEL MUNDIAL E NACIONAL.....	13
2.2 PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NA DURABILIDADE	15
2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DA MADEIRA.....	17
2.4 COMPARATIVOS DE CUSTOS	18
2.5 DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA – ABNT NBR 7190:2022.....	18
2.6 PRINCIPAIS OBRAS NO BRASIL E NO MUNDO	19
2.6.1 Metropol Parasol.....	19
2.6.2 Pompidou de Metz.....	20
2.6.3 Pavilhão Francês	21
2.6.4 Edifício Hoho Viena	22
2.6.5 Edifício Mjøstårnet	23
2.6.6 Tamedia Office Building.....	24
2.6.7 The Tree	25
2.6.8 Expodach in Hanover	26
2.6.9 Estádio Altusried.....	26
2.6.10 Casa do Hélio Olga.....	27
2.6.11 Hotel Nova Friburgo.....	28
2.6.12 Residência do escritório O NORTE.....	29
2.7 CONSIDERAÇÕES DO DIMENSIONAMENTO	29
2.7.1 Caracterização	30
2.7.2 Flexão.....	31
2.7.3 Cisalhamento.....	32
2.7.4 Compressão simples	32
3 METODOLOGIA	34
3.1 PROJETO.....	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39

4.1 PESQUISA LOCAL SOBRE O USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL	39
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ESPÉCIES ADOTADAS.....	40
4.2.1 Caracterização da madeira de pinus.....	40
4.2.2 Caracterização da madeira de eucalipto	41
4.3 PRÉ-DIMENSIONAMENTO	42
4.4 DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DE PILARES E VIGAS	43
4.4.1 Vigas	52
4.4.1.1 Flexão	52
4.4.1.2 Cisalhamento	53
4.4.2 Pilares	53
4.4.2.1 Verificação da tensão de compressão	53
4.4.2.2 Análise de estabilidade.....	54
4.4.2.3 Esbeltez relativa	54
4.4.2.4 Condição de estabilidade para peças comprimidas	54
4.5 CONSIDERAÇÕES DAS SEÇÕES DAS PEÇAS	56
4.5.1 Madeira de Pinus.....	56
4.5.2 Madeira de Eucalipto	56
4.6 DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	58
5 CONCLUSÃO.....	60
REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

A madeira é erroneamente vista como um material inferior, devido ao desconhecimento das características do material, havendo também um baixo aprofundamento ou falta de abordagem do dimensionamento com estruturas de madeira em instituições de ensino, conforme apontam Pons e Knop (2020). Os mesmos autores realizaram uma pesquisa, onde 40 profissionais da área da construção civil responderam a questionários eletrônicos acerca da utilização da madeira. A maioria dos profissionais respondeu não utilizar a madeira como o material base de uma obra por falta de conhecimento de trabalhar com ela; por meio de questionários na pesquisa, identificou-se também a não utilização por falta de aceitação no mercado.

Júnior, Silva e Soares (2017) mencionam que houve um investimento empresarial em pesquisas com relação às estruturas de concreto armado e de aço, o que deu destaque à utilização desses materiais e colocou a utilização da madeira de lado contemporaneamente. Os mesmos autores salientam que o uso da madeira de forma permanente ocorre como revestimento, cobertura, mobiliário e em fundações, tendo a possibilidade de construção completa somente com madeira, contudo, ela pode agir de forma secundária também, como na aplicação dos escoramentos, formas, esquadrias, andaimes e nos barracões.

Além da abordagem sobre falta de conhecimento na aplicação da madeira como material estrutural, destaca-se que a referida norma brasileira sobre o dimensionamento, ABNT NBR 7190, foi atualizada em 29 de junho de 2022. A atualização de uma normativa de projeto estrutural acarreta adaptações de procedimentos de cálculo já consolidados anteriormente. Visto que a última versão da normativa era de 1997, é importante a avaliação e o estudo das novas bases de cálculo. Dimensionar a estrutura principal com a normativa recém-lançada, sem livros didáticos como base de apoio, enfatizam a importância do presente trabalho.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo adaptar a estrutura principal (entendida nesse trabalho como a estrutura das vigas e pilares) de uma obra originalmente concebida em alvenaria convencional, para madeira. A estrutura foi dimensionada através da norma ABNT NBR 7190:2022 Projeto de estruturas de madeira Parte 1: Critérios de dimensionamento. O projeto é locado na cidade de Ponta Grossa – Paraná, e a madeira utilizada foi escolhida com base em uma pesquisa regional.

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo dimensionar a estrutura principal de vigas e pilares em madeira de um projeto originalmente concebido para ser de concreto armado e alvenaria convencional.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos que serão desenvolvidos são apresentados a seguir:

- a) escolher duas espécies de madeira para adaptação do projeto, com a indicação por empresas do ramo na região de Ponta Grossa - PR, baseando-se de uma pesquisa de campo convencional;
- b) adaptar o projeto da obra selecionada conforme a metodologia, ao dimensionamento feito com madeira, utilizando as espécies selecionadas, segundo as premissas recém atualizadas da ABNT NBR 7190:2022 Projeto de estruturas de madeira Parte 1: Critérios de dimensionamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 USO ATUAL A NÍVEL MUNDIAL E NACIONAL

Cruz (2006) aponta que a construção de casas de madeira vem sendo utilizadas no mercado principalmente através de empresas com foco no sistema pré-fabricado; as empresas do tipo se destacam pela proposta de personalização do projeto que pode ser feita a partir de modelos planejados, bem como de segurança e durabilidade da edificação. O mesmo autor salienta que o setor de construção de casas de madeira no Brasil não é organizado, assim, alguns especialistas recomendam até mesmo a contratação de um engenheiro ou arquiteto independente para verificação do projeto desenvolvido pela empresa. Já nos EUA, Cruz (2006) ressalta haver uma melhor organização, sendo que existem diversos materiais didáticos que concedem informações e orientações a respeito da construção de casas de madeira, principalmente do *wood-framing*, para capacitação das pessoas.

É interessante destacar que nos Estados Unidos o *wood frame* é tão utilizado que 95% das residências abordam a tecnologia desse sistema, havendo uso amplo em outros países também, enquanto no Brasil a primeira casa com esse sistema só foi construída em 2001, ressaltam Júnior, Silva e Soares (2017). Os mesmos autores explanam que o *wood frame* é um sistema pré-fabricado de paredes, pisos e telhados, que possibilita a construção de edifícios de até 5 pavimentos; além de proporcionar conforto térmico e acústico, ele permite um bom controle financeiro e de execução ainda na fase de projeto.

Os mesmos autores também mencionam que há uma tendência de se utilizar materiais que tenham um consumo energético baixo e que sejam renováveis, com isso a madeira vem ganhando destaque no setor construtivo, principalmente, pois se comparada aos principais materiais empregados na construção civil, a madeira tem o menor consumo energético, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Consumo de energia para produção de diferentes materiais

Para 1 tonelada de material	kg EC (1 kg EC = 3000 Kcal)
Alumínio	4200
Plástico	1800
Aço	1000
Tijolo cerâmico	140
Tijolo concreto	25
Madeira	0,8

Fonte: Adaptado de JÚNIOR, SILVA e SOARES (2017).

Uma análise da Tabela 1 mostra como o consumo de energia da madeira é inferior ao de outros principais materiais empregados na construção civil, esse consumo de energia está ligado a diferentes atividades relativas a cada material, como extração, transformação, distribuição, etc. O valor do consumo contido na madeira é decorrente principalmente da extração e do transporte da matéria-prima, enquanto em outros materiais, há um consumo de energia relevante na etapa de transformação.

Outros sistemas construtivos em madeira são mencionados por Paese (2012), que aborda, por exemplo, o *log house* (casa de troncos), que como o nome sugere, utiliza toras e troncos de maneira maciça. Há também o sistema viga-pilar, que de acordo com o mesmo autor, possui diferentes maneiras de abordagem, e uma delas seria a casa de tábuas e mata-junta (casa araucária), a qual utiliza de tábuas para construção de casas populares. Outras utilizações mencionadas pelo mesmo autor seriam o sistema *brettstapel*, que envolve pranchas de madeira maciça empilhadas, a viga-pilar pré-fabricada, na qual os pilares e vigas possuem função estrutural e as paredes a de vedação e contraventamento, e o *thermolog*, que é montado em painéis de OSB¹ ou LVL², com acabamento externo feito em toras, sendo este último totalmente industrializado.

Com base no trabalho: *modern tall wood buildings* da Dovetail Partners (2016), na construção em altura, é possível a utilização da madeira por meio de painéis conhecidos como madeira laminada colada cruzada, que são feitos de camadas de madeira serrada coladas com fibras em camadas que se alternam perpendicularmente. Segundo o mesmo trabalho, este material constitui em suas

¹ Painel feito de tiras de madeira que são orientadas na mesma direção, a sigla vem da língua inglesa: *oriented strand board*.

² Madeira serrada laminada colada, a sigla vem da língua inglesa: *laminated veneer lumber*.

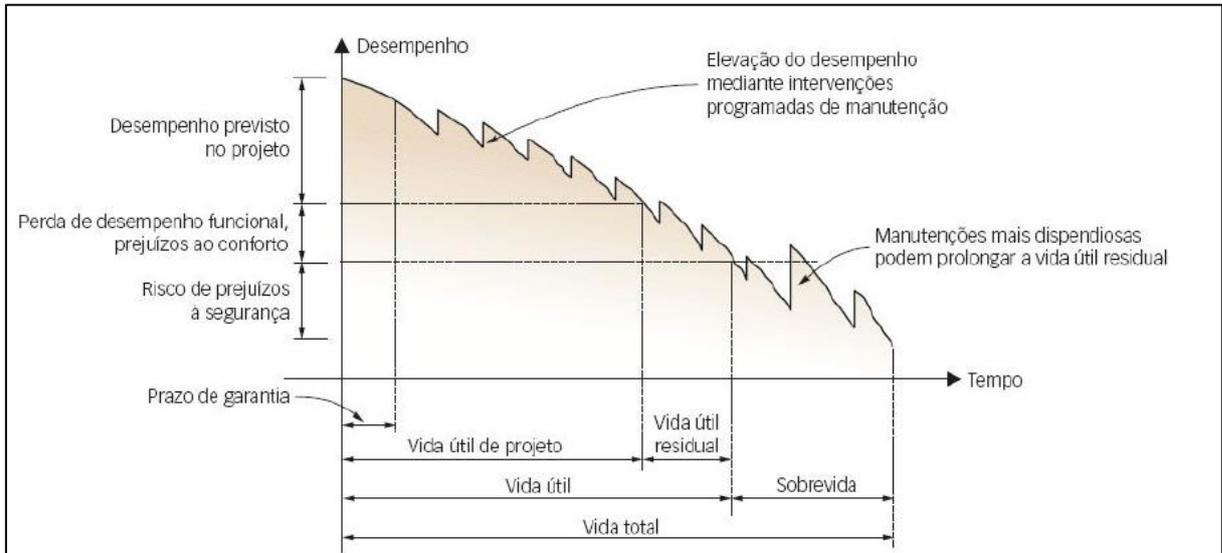
vantagens grande resistência a solicitações, renovabilidade, sustentabilidade, além de ser resistente ao fogo; é constatado também que por meio da concepção técnica do material, seria possível executar edifícios de até 40 andares com ele, atualmente nenhum edifício chegou a esse limite, contudo, existem construções estruturadas em madeira com mais de 80 metros de altura. Por fim, esse trabalho da Dovetail Partners (2016) ressalta que a utilização do uso de madeira em arranha-céus é incentivada pela inovação em *design* e alívio do impacto nas mudanças climáticas que é causado pela emissão de carbono no setor da construção civil.

2.2 PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NA DURABILIDADE

De acordo com Brito (2014), há uma falta de cultura de manutenção em estruturas de madeira, o que faz com que órgãos federais priorizem apenas a execução, não se preocupando com a devida conservação. Contudo, segundo o mesmo autor, muitos agentes ambientais, como a chuva, ou a incidência de raios solares, podem reduzir o desempenho de estruturas de madeira ao longo do tempo, e a estrutura com desempenho reduzido pode apresentar manchas, áreas úmidas, infiltração, etc.

De acordo com o mesmo autor, o projetista deve levar em conta esses agentes, além de definir planos de inspeção e manutenção periódica no momento de elaborar o projeto, pois essas estruturas precisam ser periodicamente conservadas ou reabilitadas, para manter um bom desempenho, conforme observa-se na Figura 1. Apesar da priorização da execução nesse tipo de estrutura, é importante salientar que os defeitos que possam aparecer podem ser decorrentes de falha na execução ao invés de manutenção inadequada, tendo como principais erros a execução incorreta das ligações, excentricidades em aplicações de carga e falta de sistemas de contraventamento (BRITO, 2014).

Figura 1 – Gráfico geral de desempenho x vida útil



Fonte: Brito (2014).

Uma análise aprofundada na Figura 1 mostra a importância da realização de manutenções, após a finalização da edificação, a ação dos agentes ambientais faz o desempenho da estrutura reduzir com o passar do tempo. A atividade de manutenção eleva esse desempenho, aumentando o tempo de vida total da construção também. É importante compreender que cada edificação tem um desempenho previsto em projeto, o qual com atividades de manutenção regulares, estabelece o tempo de vida útil de projeto. Quando o desempenho está um pouco inferior a esse previsto, tem-se o conforto prejudicado, e a construção já se encontra no período de vida útil residual, contudo, existe um desempenho que a edificação deve expressar para garantir sua segurança; quando esse valor é alcançado com o passar do tempo, estabelece-se o período de sobrevida, e nele as manutenções podem ser custosas para o aumento da vida útil da edificação.

De acordo com Ducatti (2000), a diminuição da umidade ocasiona a retração volumétrica da madeira, portanto é importante que haja a secagem do material previamente a sua manufatura, caso não haja a correta secagem da madeira, ela estará sujeita a alterações de ordem estrutural. O mesmo autor cita os principais defeitos de secagem, dentre eles há o colapso, que é indicado por ondulações na peça de madeira, originado pela contração intensa ou não uniforme das células de madeira. Ducatti (2000) ainda cita os empenamentos, que são distorções com relação aos planos originais da madeira, o que pode ter origem na anisotropia da madeira (a

deformação não tem comportamento semelhante em todas as direções) ou pela diferença da setorização da peça, como entre cerne e alburno, ou entre madeira adulta e juvenil.

Um outro principal defeito de secagem abordado por Ducatti (2000) são as rachaduras, elas são aberturas estreitas e longas, causadas pela secagem excessivamente rápida da madeira. O tipo de rachadura é categorizado de acordo com a região em que ocorre na peça, podendo ser rachadura de topo (nas extremidades da peça), de superfície (na face lateral), ou rachaduras internas. Por fim, o encruamento é um defeito também conhecido como endurecimento superficial, ele é causado também por secagem rápida, porém de maneira desuniforme, podendo gerar rachaduras internas na peça (DUCATTI, 2000).

2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DA MADEIRA

Dentre as vantagens da utilização da madeira como material de construção, Júnior, Silva e Soares (2017) destacam o baixo consumo energético de sua produção, ela é um material natural e renovável, tendo o valor do consumo energético tendendo a ser inferior ao comparado com produtos de origem industrial. Os mesmos autores citam que a madeira é um material de fácil trabalhabilidade, permitindo em uma obra menor desperdício, sendo que no sentido de ser reutilizável, a madeira tem a possibilidade de receber um uso alternativo do que o concebido originalmente, ela não necessita de mão de obra especializada em projetos pequenos, e pode abordar o sistema pré-fabricado para possibilitar maior qualidade.

Outro fator apontado por Júnior, Silva e Soares (2017) é o de que construções em madeira proporcionam segurança, pois são obras duráveis. Há construções que foram realizadas a mais de 1000 anos atrás em madeira, sendo que o material não perde imediatamente sua função estrutural caso haja algum incêndio, resistindo por um tempo previsível e maior ao comparado a outros sistemas construtivos, o que favorece a evacuação de pessoas no caso de alguma ocorrência. Por fim, os mesmos autores mencionam o conforto térmico e acústico, sendo que a madeira absorve muito menos calor do que o tijolo cerâmico, favorecendo a uma menor necessidade de isolamento.

Brasil *et al.* (2021), cita algumas desvantagens do uso da madeira na construção civil, como a dificuldade no nivelamento, a exemplo da imperfeição da tora, também há a restrição da madeira poder ser utilizada para fins construtivos em apenas

uma obra, não tendo a possibilidade de ser readequada ou reformada. Outros aspectos de destaque descritos pelos mesmos autores seriam a necessidade de manutenção, esta sendo uma atividade essencial para a conservação, e a falta de resistência e estabilidade para desastres naturais, não sendo indicada em regiões em que estes tenham previsão de ocorrência, com destaque para enchentes, furacões e deslizamentos.

2.4 COMPARATIVOS DE CUSTOS

Carneiro (2017) realizou um comparativo de custos em seu trabalho abordando os sistemas construtivos de *wood frame* e concreto armado, ele analisou os custos para uma casa térrea de 72,5 m² que seria semelhante nos dois sistemas, onde seguiu-se a estrutura de orçamento do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI). Em considerações finais ao comparativo, o mesmo autor destacou que os custos ficaram ligeiramente próximos, sendo que o empreendimento em *wood frame* ficou estabelecido em R\$98.574,98, o que foi um custo 3,62 % menos oneroso do que o sistema em concreto armado.

Outro comparativo realizado entre o custo de construção desses sistemas foi apresentado por Viana (2020), onde foi abordada uma edificação que continha três pavimentos tipo, um andar térreo, hall e escada. Não foi informada a metragem quadrada da edificação, mas destacou-se que cada apartamento possui um quarto, dois banheiros (suíte e social), cozinha, área de serviço, varanda e sala para dois ambientes. O mesmo autor analisou o custo dos dois empreendimentos, onde também teve uma leve diferença, sendo que foi estimada uma faixa de valores para cada um deles, onde o de concreto armado e alvenaria variou de R\$1.456.794,35 a R\$1.696.052,57, enquanto o em *wood frame* variou de R\$1.383.575,49 a R\$1.629.819,35. A partir das considerações metodológicas do trabalho, Viana (2020) constatou que o custo do sistema em *wood frame* teve um valor global 4,4 % menor do que o de concreto armado e alvenaria.

2.5 DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA – ABNT NBR 7190:2022

Até a data 29 de junho de 2022, podia-se executar o dimensionamento de uma construção em madeira utilizando a norma ABNT NBR 7190:1997 que trata de projetos em estruturas de madeira. Essa norma trazia informações importantes utilizadas no dimensionamento até a data em questão, como a resistência mecânica

de espécies de madeira, fórmulas, tabelas, coeficientes, etc. Os cálculos realizados seguiam uma sequência de etapas na norma, conforme a seguinte ordem: esbeltez da peça, carga crítica de Euler, excentricidade (acidental, inicial, complementar e total), momento fletor, tensões, verificação e tração.

A norma em questão foi atualizada na data declarada, trazendo detalhes de dimensionamento que estavam faltando. Ela foi dividida em 7 partes, onde a primeira traz os critérios de dimensionamento, e as outras partes esclarecem os métodos de ensaio para as peças estruturais, conectores mecânicos e alguns tipos de madeira. Como a atualização é recente, ainda está a ser realizada uma verificação das mudanças normativas.

2.6 PRINCIPAIS OBRAS NO BRASIL E NO MUNDO

A seguir, são apresentadas as principais obras que abordam a utilização de madeira no Brasil e no mundo, elas foram selecionadas com base em sua importância, novidade de projeto, ou tamanho. Com relação às informações contidas em cada seção, merece destaque o trabalho de Manfrinato (2015) que abordou várias obras de importância internacional, mas como nele algumas obras descritas ainda estavam em execução, também foram consultadas algumas páginas na internet, como de companhias que trabalham com madeira, para fins de complementar ou atualizar informações. Também é interessante abordar o trabalho *Modern Tall Wood Buildings* da Dovetail Partners (2016), que tem a temática de edifícios altos em madeira, e favoreceu a confirmação de informações. Já para as informações referentes a obras nacionais, destaca-se o trabalho de Chacon (2020), estas sendo organizadas nas últimas seções das obras.

2.6.1 Metropol Parasol

Segundo Manfrinato (2015), o Metropol Parasol (indicado nas Figuras 2 e 3) é a maior estrutura em madeira laminada existente no mundo, representando um ícone da estrutura moderna. Possui 5 pisos distribuídos em 26 metros de altura, o aspecto da obra é de 6 guarda-sóis inspirados nas abóbadas da catedral de Sevilha. A mesma autora destaca que a construção se encontra na Espanha, na zona antiga da Sevilha, e que foram utilizados cerca de 3000 m³ de madeira laminada conectadas com parafusos para sua contemplação.

Figura 2 – Estrutura MLC do Metropol Parasol



Fonte: Manfrinato (2015).

Figura 3 – Vista panorâmica do Metropol Parasol



Fonte: Manfrinato (2015).

2.6.2 Pompidou de Metz

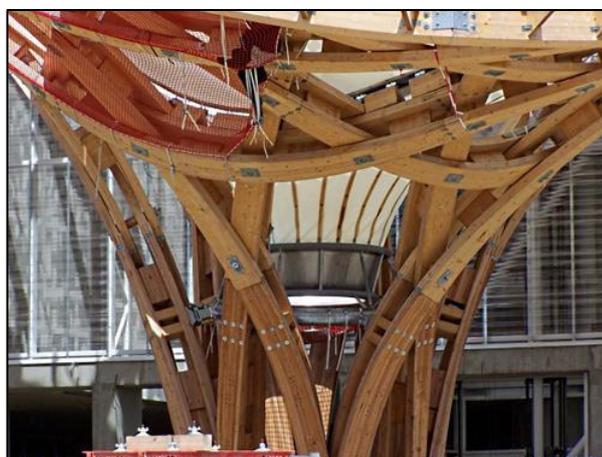
Também abordado por Manfrinato (2015), o Pompidou de Metz, indicado na Figura 4, se trata de um museu de arte moderna e contemporânea que se localiza na França, a estrutura de seu telhado que é feita em madeira laminada e colada, que seria a única opção para executar fielmente os detalhes de projeto da construção que abordam formas moduladas. Segundo a mesma autora, no centro de construção da obra, que detém um plano hexagonal, há um pé direito de 77 metros, as treliças que vão até a cobertura constituem a montagem de 16 km em medidas acumuladas de Viga Laminada Colada de uma espécie de conífera, as vigas se cruzam de maneira a formar uma malha, como indicado na Figura 5.

Figura 4 – Fachada do Pompidou de Metz



Fonte: Manfrinato (2015).

Figura 5 – Malha de treliças em MLC

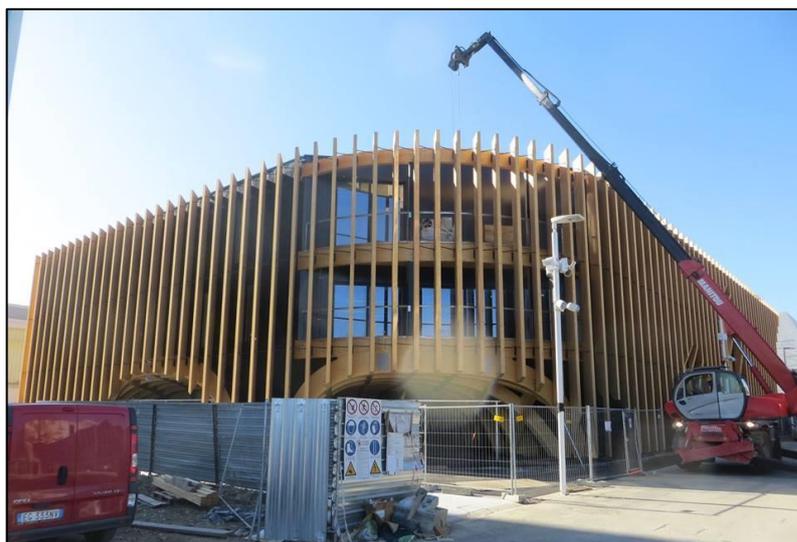


Fonte: Manfrinato (2015).

2.6.3 Pavilhão Francês

Manfrinato (2015) também aborda o Pavilhão Francês, trata-se de uma obra geométrica complexa, concebida a partir de cortes digitais e programas 3D. A fachada próxima ao fim do processo de execução é indicada na Figura 6, enquanto a Figura 7 dispõe a concepção estrutural da obra, a qual foi realizada em Milão, na Itália, relacionada a uma exposição universal. A mesma autora também ressalta que é aparente a experiência de exploração de estruturas de madeira nesta construção, com boa parte de seus elementos constituintes deste material em forma livre.

Figura 6 – Fachada em execução do Pavilhão Francês



Fonte: Manfrinato (2015).

Figura 7 – Estrutura do Pavilhão Francês



Fonte: Manfrinato (2015).

2.6.4 Edifício Hoho Viena

Indicado na Figura 8, é um dos maiores arranha-céus em madeira no mundo, tendo 76% de sua torre concebida no material, ele tem 84 metros de altura, dividido em 24 andares, foi concluído em 2019; esse é um exemplo de construção a qual demonstra que a madeira é uma alternativa sustentável de material que pode vir a ser tendência de prédios em cidades grandes (MANFRINATO, 2015).

Figura 8 – Fachada do edifício Hoho



Fonte: TALL pioneer. Disponível em: <https://www.setragroup.com/en/press/news/tall-pioneer/>. Acesso em 09 jul. 2022.

2.6.5 Edifício Mjøstårnet

A Moelven é uma companhia que participou da construção do edifício que neste trabalho é referenciado por Mjøstårnet (2022), ilustrado na Figura 9, esse é o maior edifício em madeira concluído atualmente, tendo 85,4 m de altura e 18 andares. Localizado na Noruega, ele contém a função de hotel e restaurante, além de possuir escritórios e apartamentos; a mesma empresa destaca que o processo de construção se separou em 5 etapas, sendo que em cada etapa foram construídos 4 andares. Os pilares, vigas e diagonais foram concebidos em madeira laminada e colada, o poço do elevador e a sacada em madeira laminada colada cruzada e lajes cobertas com o sistema Trä8 a partir do andar 11; o sistema Trä8 constitui bases mais rígidas, porém mais onerosas.

Figura 9 – Fachada do edifício Mjøstårnet



Fonte: MJØSTÅRNET. Disponível em: <https://www.moelven.com/mjostarnet/>. Acesso em 11 jul. 2022.

O sistema Trä8 é, segundo Swedish Wood (2016), um sistema de vigas e pilares de madeira desenvolvido para edifícios do mesmo material, elaborado pela Moelven Töreboda AB na Suécia, este sistema é constituído por madeira laminada e colada e kerto LVL³. O mesmo autor também esclarece que o sistema é baseado na divisão retangular em um plano, conforme representado pela Figura 10, além disso, o sistema Trä8 possibilita um vão máximo de 8 m, o que permite a transposição do uso somente para residências.

Figura 10 – Sistema Trä8 de vigas e pilares de madeira



Fonte: Swedish Wood (2016).

2.6.6 Tamedia Office Building

Este é um edifício comercial de 6 pavimentos estruturado em madeira, tendo inspiração da arquitetura japonesa. A parte estrutural não ficou restrita a apenas as vigas e pilares em madeira, tendo sua superestrutura indicada na Figura 11 (MANFRINATO, 2015). A mesma autora salienta que nesta obra foram utilizados também buchas e conectores em madeira compensada, mostrados na Figura 12, o

³ Produto de madeira serrada laminada colada, na sigla, LVL designa em inglês: *laminated veneer lumber*.

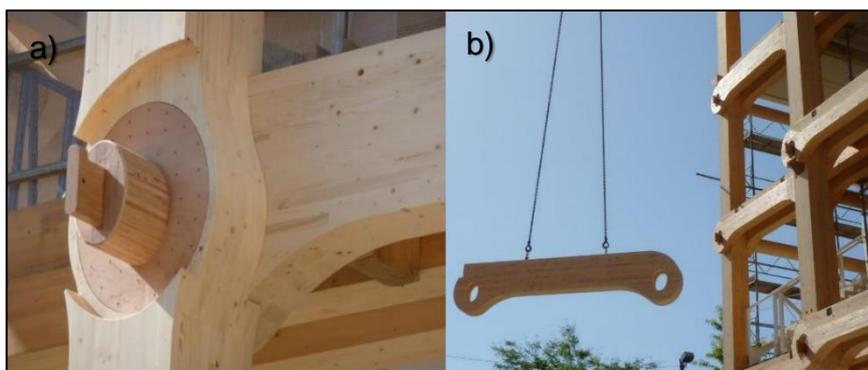
que demonstra o potencial de utilização do material na indústria de construções e projetos de grande porte.

Figura 11 – Superestrutura do Tamedia Office Building



Fonte: Manfrinato (2015).

Figura 12 – a) estrutura da bucha para o vínculo das peças do edifício; b) conectores das peças estruturais do edifício



Fonte: Adaptado de Manfrinato (2015).

2.6.7 The Tree

O The Tree (Figura 13) foi, segundo Manfrinato (2015), um edifício marcante pela altura que ele alcançou tendo sua concepção em madeira, construído na Noruega, com 14 andares em 49 metros de altura. De acordo com a mesma autora, ele tem uma proteção de aço e vidro em sua fachada com o intuito de proteção contra umidade, o projeto combina construção modular com estruturas de madeira, sendo que este último fator mostra um comprometimento sustentável.

Figura 13 – Fachada do edifício The Tree



Fonte: Manfrinato (2015).

2.6.8 Expodach in Hanover

Ilustrado na Figura 14, é um grande trabalho de construção em madeira no mundo, contendo 10 planos com diferentes camadas de madeira, as denominadas conchas de reforço, além de vigas em balanço, nós de aço e torre de sustentação (MANFRINATO, 2015). Essa obra expressa a adaptação da madeira à arquitetura contemporânea, a qual busca estruturas mais leves atendendo a vãos maiores.

Figura 14 – Expodach in Hanover



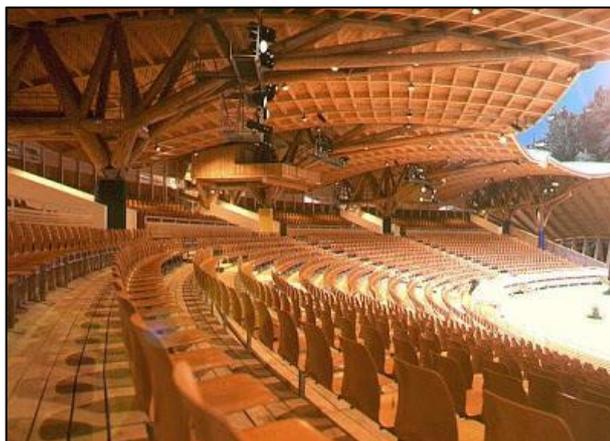
Fonte: Manfrinato (2015).

2.6.9 Estádio Altusried

Todo em madeira, compõe 5 treliças espaciais de madeira roliça, sua cobertura é do tipo telhado autoportante, o qual fornece o reforço desejado no caso, além de ser leve (MANFRINATO, 2015). A obra do estádio foi um marco importante na utilização

da madeira em construções, conforme a autora, pois reforçou a possibilidade de utilização estrutural do material em uma abordagem técnica diferente da convencional, sendo uma vista do estádio mostrada a seguir, na Figura 15.

Figura 15 – Estádio Altusried

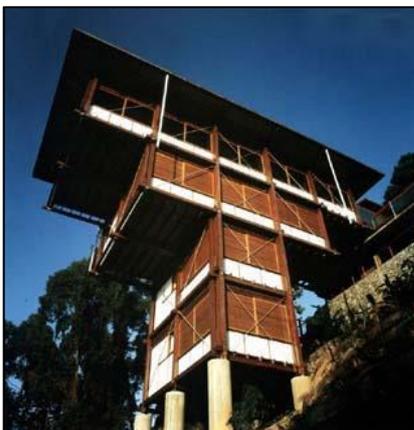


Fonte: Manfrinato (2015).

2.6.10 Casa do Hélio Olga

Dando início às obras nacionais, Manfrinato (2015) destaca a casa do Hélio Olga (Figura 16), este é um engenheiro que viabiliza diversas obras com a estrutura de madeira. A autora realça que a casa em questão é constituída principalmente por madeira maciça, material que fornece seu arranjo estrutural, sendo simétrico e equilibrado por contraventamentos dos cabos de aço. O sistema de treliças de madeira principal é localizado simetricamente por meio de balanços com suas sequências em cada andar. A casa foi dimensionada de forma a acoplar, além das instalações, um sistema de ventilação cruzada, que conforme o trabalho de Manfrinato, o ar fresco é direcionado por convecção aos ambientes por meio de aberturas no piso, havendo a liberação do ar quente na cobertura.

Figura 16 – Fachada da casa do Hélio Olga



Fonte: Manfrinato (2015).

2.6.11 Hotel Nova Friburgo

Este hotel é exibido na Figura 17, foi construído durante a segunda 2ª Guerra Mundial, sendo marcante pois sua concepção era de ser uma construção temporária, construído na época com madeira de eucalipto, pedras e cerâmicas, contudo, a construção passou pelos fatores sociais da época e chegou a suportar uma grande enchente na cidade, o que transmite uma imagem de resistência para a madeira. (CHACON, 2020)

Figura 17 – Hotel Nova Friburgo



Fonte: CHACON (2020).

2.6.12 Residência do escritório O NORTE

Chacon (2020) cita que no começo dos anos 2000, uma residência unifamiliar (Figura 18) foi projetada pelo escritório O NORTE, que abrange duas estruturas independentes, onde as áreas secas foram concebidas em madeira, enquanto as molhadas em alvenaria, com separação para banheiro e caixa d'água. As peças de madeira foram organizadas de forma a permitir que a luz entrasse por brechas em suas paredes, bem como para ventilação, o que ao final da execução da obra, forneceu uma casa porosa e sustentável, segundo o autor.

Figura 18 – Residência elaborada pelo escritório O NORTE



Fonte: CHACON (2020).

2.7 CONSIDERAÇÕES DO DIMENSIONAMENTO

Para a realização do dimensionamento de projetos estruturais, devem ser seguidas as normas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas. (ABNT). Para o caso das estruturas de madeira, é abordada como base a norma ABNT NBR 7190:2022.

A atualização da norma foi concebida 25 anos após a versão anterior, de 1997, com a nova versão, a norma ficou dividida em sete partes. Dentre as mudanças trazidas pela versão de 2022, tem-se que o k_{mod} é obtido a partir do produto de dois coeficientes, o k_{mod1} e k_{mod2} , sendo que o k_{mod3} , o qual era utilizado na versão antiga, não possui mais uma aplicação para a determinação dos valores de cálculo. O k_{mod} é um coeficiente de modificação, que é utilizado na determinação dos valores de cálculo. Os dois coeficientes mencionados já eram utilizados de maneira semelhante na norma antiga, a diferença é que agora o k_{mod1} ganhou uma coluna em sua tabela

com informações a respeito do tempo das ações variáveis, enquanto o k_{mod2} tem agora valores específicos a serem adotados a depender da classe de umidade.

A nova versão deixou de usar a palavra dicotiledônia, sendo usada a palavra folhosas para se referir às madeiras desse tipo. É importante ressaltar que agora as classes de resistência das madeiras dicotiledôneas são abordadas com a letra D, e que há um maior número de classes para separar as espécies de madeira e permitir melhores especificações em projetos. Outra mudança notória está no coeficiente de minoração para determinação dos valores de cálculo, onde com a norma em vigor, há a orientação em utilizar coeficientes de 1,4 para a obtenção dos valores, com exceção do cisalhamento, onde há a indicação do valor de 1,8. Na versão anterior da norma em questão, eram utilizados coeficientes de valores 1,8, com exceção da compressão, que era a única a abordar o coeficiente de 1,4. Também vale citar que as propriedades de rigidez, com relação aos módulos de rigidez transversal e longitudinal, tiveram alterações na forma de determinação com a atualização normativa.

A seguir, são apresentadas as equações estabelecidas pela referida norma, que estão relacionadas ao dimensionamento realizado para adaptação do projeto de estudo deste trabalho.

2.7.1 Caracterização

Para a obtenção dos valores de cálculo das propriedades, primeiramente é necessário determinar o valor de k_{mod} , pois este altera os valores característicos. Segundo a norma ABNT NBR 7190:2022 o valor de k_{mod} é obtido a partir do produto entre dois coeficientes de modificação, conforme a equação 1 mostrada a seguir:

$$k_{mod} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \quad (1)$$

Os valores a serem considerados em cada um dos coeficientes dependem de considerações de cada projeto, nos Quadros 1 e 2, estão os valores possíveis a serem considerados em cada um dos coeficientes.

Quadro 1 – Valores de K_{mod1}

Duração acumulada	Ordem de grandeza da duração acumulada da ação característica	Madeira serrada
Permanente	Mais de dez anos	0,6
Longa duração	Seis meses a dez anos	0,7
Média duração	Uma semana a seis meses	0,8
Curta duração	Menos de uma semana	0,9
Instantânea	Muito curta	1,1

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190:2022 – Tabela 4.

Quadro 2 – Valores de K_{mod2}

Classes de umidade	Madeira serrada
1	1
2	0,9
3	0,8
4	0,7

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190:2022 – Tabela 5.

Já os valores de cálculo são obtidos por meio da expressão apresentada a seguir, na equação 2, onde X_d representa o valor de cálculo da propriedade abordada, que é o valor pretendido de ser determinado, enquanto X_k é o valor característico, e por fim, γ_w é um coeficiente de minoração. Os valores do coeficiente de minoração equivalem para estados-limite últimos à 1,4 quando decorridos de tensões normais, e à 1,8 quando decorridos de tensões de cisalhamento.

$$X_d = k_{mod} \cdot \frac{X_k}{\gamma_w} \quad (2)$$

2.7.2 Flexão

Na verificação quanto à flexão, a norma em questão estabelece a equação (3), para a determinação do valor máximo de cálculo atuante de flexão (σ_{Md}):

$$\sigma_{Md} = \frac{M_d \cdot y}{I} \leq f_{c0,d} \quad (3)$$

Onde $f_{c0,d}$ é o valor de cálculo da resistência à flexão, I indica o momento de inércia da viga, y corresponde à metade da altura da mesma, e M_d equivale ao momento fletor de cálculo, e é dado pelo maior valor de momento fletor submetido na viga. Importante ressaltar que na atualização de 2022 da referida norma, a resistência a flexão $f_{m,d}$ pode ser dada como a própria resistência a compressão $f_{c0,d}$ da espécie.

2.7.3 Cisalhamento

Para a verificação quanto ao cisalhamento, segundo a norma ABNT NBR 7190:2022, a tensão de cisalhamento que atua no ponto mais solicitado da peça (τ_d), na determinação do cisalhamento longitudinal em vigas, é calculada conforme a equação 4, para vigas de seção transversal retangular:

$$\tau_d = 1,5 \cdot \frac{V_d}{A} \leq f_{v0,d} \quad (4)$$

Onde V_d indica a força cortante da seção em análise, enquanto A indica a área da seção transversal da viga, que no caso da seção retangular, é determinada pelo produto entre as dimensões da base e altura, o valor resultante da expressão, deve ser igual ou inferior ao valor da resistência de cálculo do cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v0,d}$).

2.7.4 Compressão simples

Conforme a norma especificada, a tensão de compressão que atua nos pilares deve satisfazer a equação 5:

$$\sigma N_{c,d} = \frac{N_{c,d}}{A} \leq f_{c0,d} \quad (5)$$

A interpretação dessa equação é que a força de compressão que o pilar se submete ($N_{c,d}$) dividida pela área da seção transversal do pilar (A) deve ser menor ou inferior ao valor de cálculo da compressão paralela às fibras ($f_{c0,d}$).

Também é necessário determinar a esbeltez do pilar, e antes de seguir para sua determinação, é interessante calcular o comprimento de flambagem, conforme demonstrado na equação 6:

$$L_0 = K_e \cdot L \quad (6)$$

Onde L_0 é o próprio comprimento de flambagem, enquanto L é a altura do pilar e K_e é o coeficiente de vinculação do elemento comprimido. Com a determinação desse valor, é possível proceder para o cálculo da esbeltez propriamente, a qual é dada pela equação 7:

$$\lambda = \frac{L_0}{\sqrt{I/A}} \quad (7)$$

Dos símbolos mostrados acima, λ representa o índice de esbeltez, enquanto L_0 o comprimento de flambagem, I o momento de inércia da direção em análise, e A é a área da seção transversal.

Em seguida, é necessário determinar a esbeltez relativa nas direções x e y , que são determinadas conforme as equações 8 e 9:

$$\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad (8)$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad (9)$$

Onde $E_{0,05}$ representa o módulo de elasticidade na direção paralela às fibras de madeira, $f_{c0,k}$ é o valor da resistência característica à compressão paralela às fibras, λ_x e λ_y são os índices de esbeltez conforme os eixos x e y , e $\lambda_{rel,x}$ e $\lambda_{rel,y}$ são os índices de esbeltez relativa.

Caso esta última expressão resulte em um valor superior à 0,3 em módulo, ainda é necessário realizar mais uma verificação, por meio das equações 10 e 11, mostradas a seguir:

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cx} \cdot f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + K_M \cdot \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (10)$$

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cy} \cdot f_{c0,d}} + K_M \cdot \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (11)$$

Onde o valor de K_M é um coeficiente de correção utilizado na norma, $\sigma_{Mx,d}$ e $\sigma_{My,d}$ são tensões normais de flexão oriundas de momento fletor de primeira ordem, $\sigma_{Nc,d}$ é a tensão de compressão submetida no pilar, já abordada previamente, e as demais incógnitas são valores de cálculo específicos de cada tipo de madeira, com exceção de k_{cx} e k_{cy} , que são coeficientes determinados diferenciadamente, conforme as equações 12 e 13:

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{(k_x)^2 - (\lambda_{rel,x})^2}} \quad (12)$$

$$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{(k_y)^2 - (\lambda_{rel,y})^2}} \quad (13)$$

São utilizados os índices de esbeltez relativa na determinação destes coeficientes, estes valores foram abordados previamente, mas além deles, são usados os coeficientes k_x e k_y , calculados conforme as equações 14 e 15:

$$k_x = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2] \quad (14)$$

$$k_y = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + (\lambda_{rel,y})^2] \quad (15)$$

Na determinação desses coeficientes são abordados novamente os índices de esbeltez relativa, contudo, agora a expressão depende do valor de β_c , o qual é o fator para peças estruturais que atendam aos limites de divergência de alinhamento, fornecido pela norma.

3 METODOLOGIA

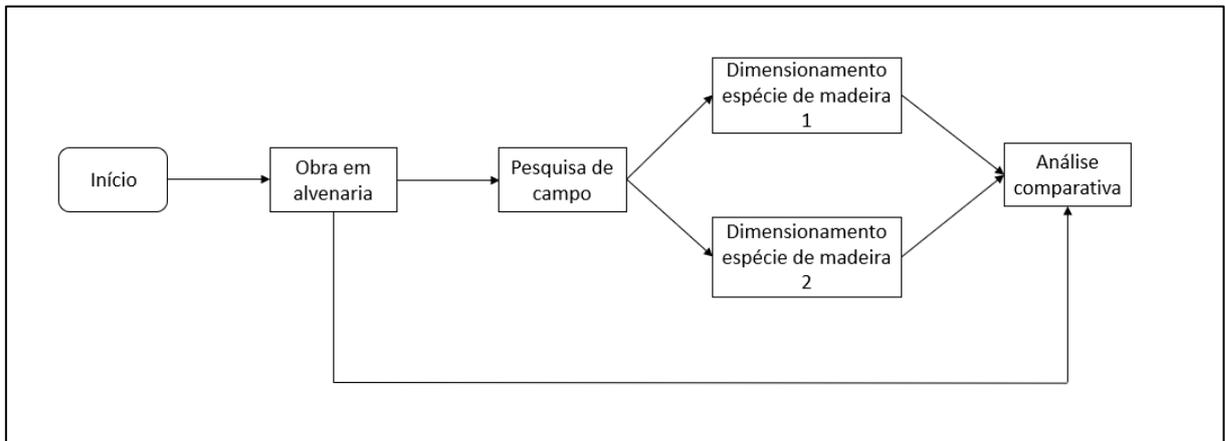
O presente trabalho abordou o levantamento quantitativo da estrutura principal de uma obra de alvenaria na cidade de Ponta Grossa-PR.

Para tanto, foi realizada uma pesquisa de campo convencional, onde foram consultadas as principais empresas da região de Ponta Grossa, que tivessem relação com o setor de construção e abordassem a madeira como material, com o intuito de realizar a seleção de 2 espécies de madeira. Após a seleção, foi feito o processo de

adaptação do projeto ao novo material, onde foi considerada a norma ABNT NBR 7190:2022 para realizar o dimensionamento de cada uma das 2 espécies.

Os procedimentos realizados neste trabalho estão ilustrados em um fluxograma na Figura 19, mostrada a seguir:

Figura 19 – Fluxograma dos procedimentos empregados na metodologia

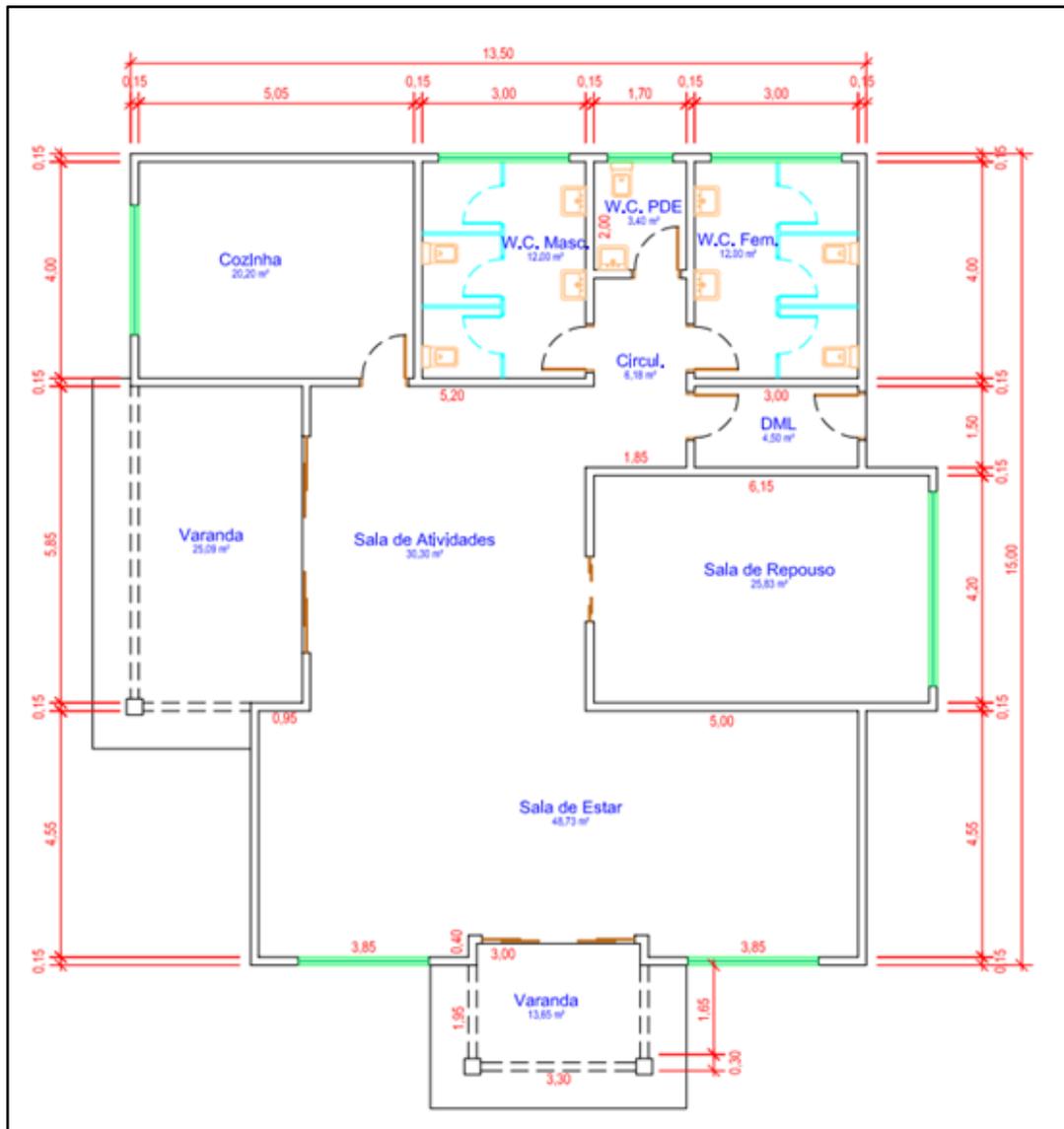


Fonte: O autor (2022).

3.1 PROJETO

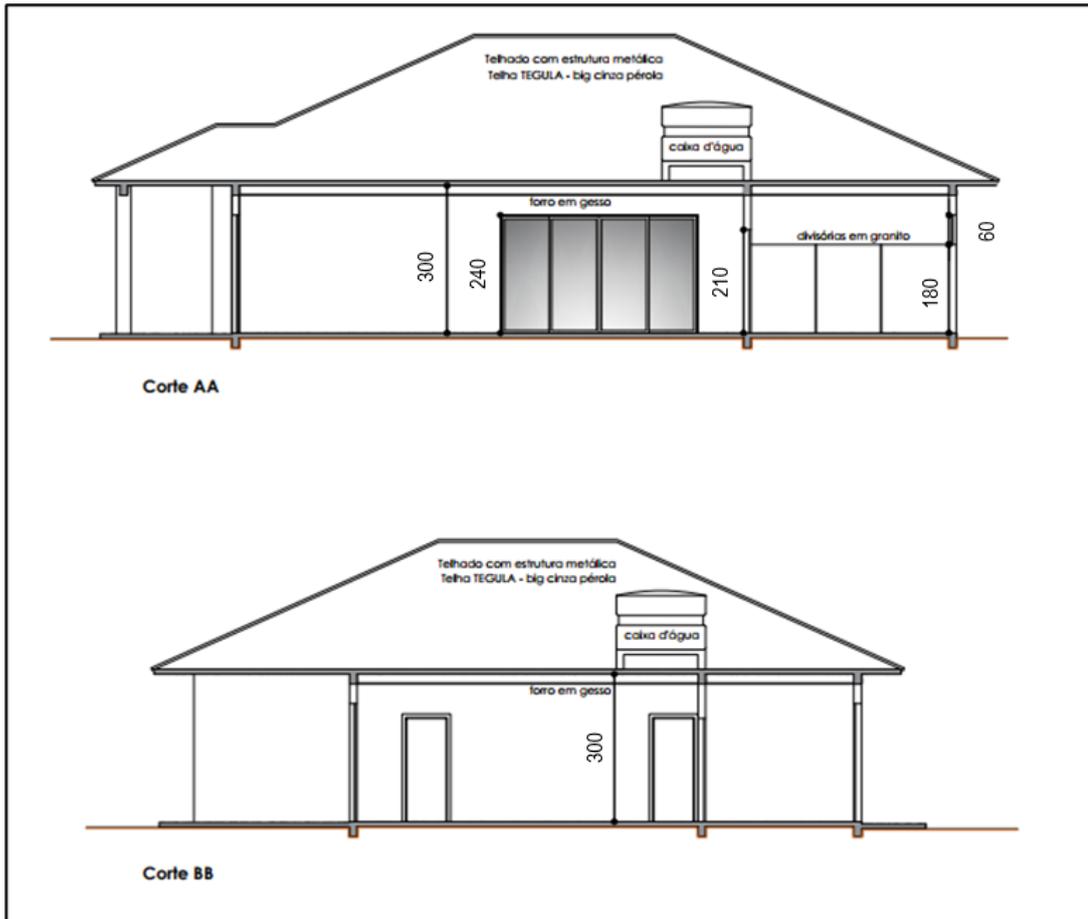
Na etapa de seleção da obra, foi escolhida a obra pública do projeto da Casa da Acolhida, a qual já foi realizada em concreto armado, no Hospital da Universidade Estadual de Ponta Grossa (HU-UEPG) de autoria de Aline Aparecida da Silva (ABRACE, 2020). A escolha deste projeto se deu pela disposição dos arquivos, que se mostram completos, tendo tabelas que poderiam auxiliar no levantamento quantitativo bem como diversos arquivos de projetos complementares. Alguns dos detalhes importantes ao projeto estão apresentados nas imagens a seguir, onde a Figura 20 aborda a planta baixa, a Figura 21 os cortes e as Figuras 22, 23, 24 e 25 uma representação 3D do projeto de cada sentido da casa.

Figura 20 – Planta baixa da casa da acolhida



Fonte: Adaptado de ABRACE (2020).

Figura 21 – Cortes da casa da acolhida



Fonte: ABRACE (2020).

Figura 22 – Representação 3D frontal da casa da acolhida



Fonte: ABRACE (2020).

Figura 23 – Representação 3D lateral esquerda da casa da acolhida



Fonte: ABRACE (2020).

Figura 24 – Representação 3D lateral direita da casa da acolhida



Fonte: ABRACE (2020).

Figura 25 – Representação 3D posterior da casa da acolhida



Fonte: ABRACE (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, são apresentados os procedimentos realizados para a obtenção dos resultados, vale destacar que os efeitos de ação do vento na estrutura foram desprezados, pois o presente dimensionamento foi realizado para uma casa térrea, e para a altura estabelecida em projeto, a consideração dos efeitos do vento seriam pouco expressivas.

4.1 PESQUISA LOCAL SOBRE O USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Conforme mencionado na metodologia do presente trabalho, a seleção das espécies de madeira a serem utilizadas na estrutura do projeto foi feita por meio de uma pesquisa de mercado. Foram escolhidas empresas de Ponta Grossa que possuem relação com o setor da construção civil e que utilizassem a madeira em seu ramo de atividade, como lojas de materiais e serrarias, essas empresas foram questionadas sobre quais as madeiras recomendadas para uso estrutural. Para não haver a divulgação das empresas envolvidas na pesquisa, elas foram nomeadas conforme a Tabela 2, mostrada em sequência:

Tabela 2 – Relação de madeiras recomendadas por cada empresa

Empresa	Madeira recomendada		
	Pinus	Pinheiro	Eucalipto
A	X	X	X
B	X		
C			X
D			X
E	X		X

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Conforme observado na tabela, foram três as espécies de madeiras abordadas pelas empresas, sendo elas Pinus, Pinheiro e Eucalipto. A empresa A foi a única que se posicionou a favor das três espécies, sendo que a empresa B foi a favor da utilização de apenas Pinus, enquanto as empresas C e D apenas de Eucalipto, por fim, a empresa E sugeriu o uso tanto de Pinus, quanto de Eucalipto. Com base na pesquisa local, a espécie de madeira mais recomendada para uso estrutural em Ponta Grossa foi a madeira de eucalipto, portanto, essa foi uma das espécies escolhidas para realizar o dimensionamento. A outra escolha foi a madeira de pinus, pois essa foi a segunda espécie de madeira mais recomendada, vale ressaltar que a madeira

de pinheiro foi recomendada apenas por uma das empresas para uso estrutural, o que demonstra um desinteresse por abordar essa espécie na região.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ESPÉCIES ADOTADAS

Para a realização da caracterização das espécies escolhidas, foram utilizadas as propriedades de cada uma das espécies de madeira que são abordadas pela norma ABNT NBR 7190:2022.

4.2.1 Caracterização da madeira de pinus

A norma em questão divide as propriedades da madeira de pinus em classes, sendo que existe uma forma de classificação visual, e outra mecânica, a Tabela 3, mostrada a seguir, exemplifica o critério de classificação mecânica da madeira de pinus.

Tabela 3 – Classificação mecânica das classes para madeira de pinus

Propriedade	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Densidade (kg/m ³)	≥500	≥400	≥350
E ₀ (MPa)	≥11000	≥8000	≥5000

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190:2022 – Tabela A.2.

Estes são apenas os critérios de classificação mecânicos, mas também há uma inspeção visual a ser realizada para determinar a classe de madeira, portanto, em favor de realizar um dimensionamento com base em segurança, foi estimada a utilização de madeira de pinus classe 3 no projeto a ser adaptado, por ser a classe que apresentaria menores valores de resistência.

No projeto em questão, há a consideração de aplicação de carga permanente na estrutura, assim, o valor de k_{mod1} é de 0,60 segundo a norma abordada. Foi considerada classe de umidade 2 no dimensionamento, o que de acordo com a mesma norma, confere o valor de 0,90 a k_{mod2} .

Como os coeficientes de modificação possuem seus valores determinados, é possível calcular o valor de k_{mod} , conforme a equação (1) apresentada na seção de caracterização da revisão bibliográfica, o qual resultou em 0,54 conforme demonstrado a seguir:

$$k_{mod} = 0,60 \cdot 0,90 \rightarrow k_{mod} = 0,54$$

Em seguida foram determinados os valores de cálculo para flexão ($f_{m,d}$), compressão paralela ($f_{c0,d}$) e cisalhamento ($f_{v,d}$) por meio da equação (2) apresentada na seção abordada. Os valores característicos foram baseados na Tabela A.3 da ABNT NBR 7190:2022.

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_d} = 0,54 \cdot \frac{14}{1,4} \rightarrow f_{m,d} = 5,40 \text{ MPa}$$

$$f_{c0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c0,k}}{\gamma_d} = 0,54 \cdot \frac{14}{1,4} \rightarrow f_{c0,d} = 5,40 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_d} = 0,54 \cdot \frac{2,5}{1,8} \rightarrow f_{v,d} = 0,75 \text{ MPa}$$

Com a determinação desses valores, finalizou-se a caracterização da madeira de pinus, e elaborou-se a Tabela 4, com o resumo dos valores obtidos:

Tabela 4 – Resumo dos valores obtidos na caracterização da madeira de pinus

k _{mod}	0,54
f _{m,d} (Resistência à flexão de cálculo) [MPa]	5,40
f _{c0,d} (Resistência à compressão paralela as fibras de cálculo) [MPa]	5,40
f _{v,d} (Resistência ao cisalhamento de cálculo) [MPa]	0,75

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.2.2 Caracterização da madeira de eucalipto

A caracterização da madeira de eucalipto foi semelhante à da madeira de pinus, visto que a norma ABNT NBR 7190:2022 aborda essas duas espécies na mesma seção. É interessante ressaltar que também recai a divisão em classes conforme aspectos mecânicos e visuais, contudo, a madeira de eucalipto apresenta outros valores para as propriedades de classe, os quais são apresentados na Tabela 6.

O valor de k_{mod} levou as mesmas considerações que a madeira de pinus, assim resultando no mesmo valor de 0,54. Tendo os valores característicos, do k_{mod} e do coeficiente de minoração, foram determinados os valores de cálculo:

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_d} = 0,54 \cdot \frac{30}{1,4} \rightarrow f_{m,d} = 11,571 \text{ MPa}$$

$$f_{c0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c0,k}}{\gamma_d} = 0,54 \cdot \frac{25}{1,4} \rightarrow f_{c0,d} = 9,643 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_d} = 0,54 \cdot \frac{4}{1,8} \rightarrow f_{v,d} = 1,200 \text{ MPa}$$

De maneira análoga à caracterização da madeira de pinus, os valores característicos foram baseados em uma tabela da norma ABNT NBR 7190:2022, a Tabela A.6. A madeira de eucalipto apresenta o resumo dos valores obtidos, por meio da Tabela 5.

Tabela 5 – Resumo dos valores obtidos na caracterização da madeira de eucalipto

k_{mod}	0,54
$f_{m,d}$ (Resistência à flexão de cálculo) [MPa]	11,571
$f_{c0,d}$ (Resistência à compressão paralela as fibras de cálculo) [MPa]	9,643
$f_{v,d}$ (Resistência ao cisalhamento de cálculo) [MPa]	1,200

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.3 PRÉ-DIMENSIONAMENTO

Para a realização do pré-dimensionamento do projeto adaptado, foi escolhida uma seção transversal para realização do dimensionamento. A posição dos pilares e vigas em que a seção escolhida compreenderia seria a mesma do projeto base em alvenaria. Foi escolhida uma seção de 15 cm x 15 cm para os pilares, e de 5 cm x 20 cm para as vigas, sendo esta uma seção comercial utilizada pela Empresa C.

Foi estimado o peso próprio da cobertura com base na norma ABNT NBR 6120:2020 (Tabelas 5, 6 e 8) da norma, a qual forneceu o peso em kN/m^2 para os elementos adotados.

Nos arquivos do projeto arquitetônico, é possível observar que o projeto foi elaborado abordando a utilização de telhas TEGULA – Big cinza perola na cobertura, com base no site da mesma marca, é destacado que essa é uma telha de concreto.

Como a norma não abrange esse tipo de telha na composição do peso da superfície horizontal, foi adotado o valor mais crítico fornecido pela Tabela 6 da norma, ou seja, $0,85 \text{ kN/m}^2$, referente à telhas cerâmicas (tipo germânica e colonial) e estrutura de madeira com inclinação menor ou igual a 40 %.

A mesma norma também fornece valores a serem adotados para o tipo de telha, contudo, esse tipo de telha também não consta na lista de telhas fornecidas, sendo que novamente foi adotada a situação que forneceria o maior peso na superfície inclinada, assim, foi adotado uma carga de $0,6 \text{ kN/m}^2$ da Tabela 5 da referida norma, que é a carga para telha cerâmica tipo germânica ou colonial.

Em seguida, foi estimada uma carga para o forro, e novamente, foi suposta a pior situação possível, portanto, considerou-se a utilização de dutos de ar-condicionado com isolamento térmico, com base na Tabela 8 da referida norma, o que condiciona uma carga de $0,3 \text{ kN/m}^2$.

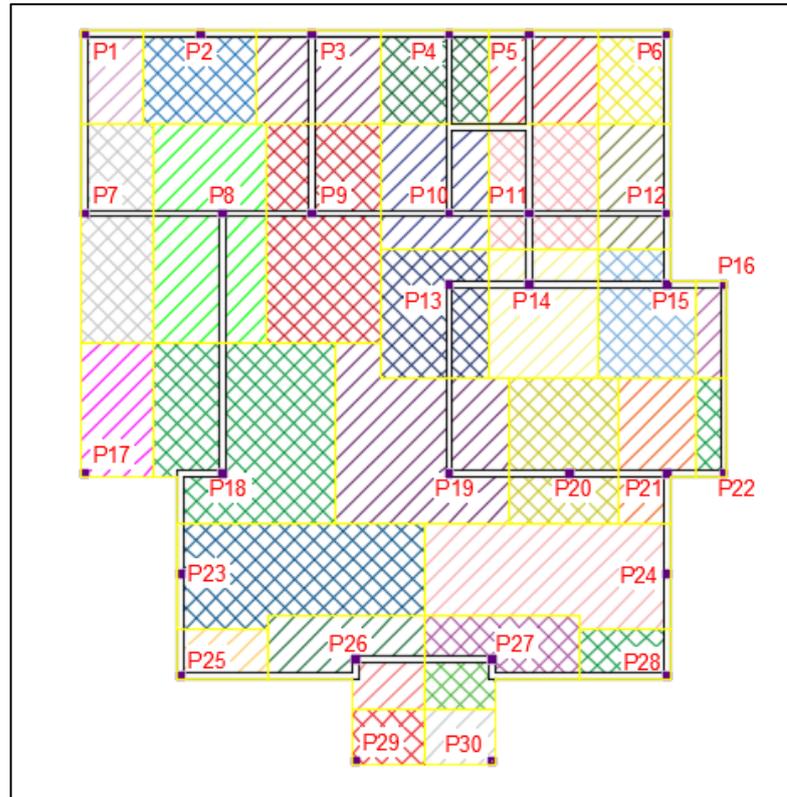
A soma das três cargas consideradas resultou em $1,75 \text{ kN/m}^2$, e essa soma foi a considerada no pré-dimensionamento.

Uma consideração importante de destacar, é que no presente dimensionamento, foram consideradas as tabelas 5 e 6 da referida norma de maneira aditiva. Na norma há uma ambiguidade se a tabela 6 faz a inclusão da carga da telha ou não, portanto, em favor da segurança, as tabelas 5 e 6 da norma foram somadas.

4.4 DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DE PILARES E VIGAS

Para a etapa de dimensionamento, foram colocados em arquivo do *software* Autodesk AutoCAD, pilares de madeira de seção da base de 15 cm x 15 cm, na posição onde estavam posicionados os pilares de concreto, conforme mostrado na Figura 26, onde cada área de influência recebeu uma hachura de cor ou forma diferente das hachuras adjacentes, para diferenciação das áreas.

Figura 26 – Captura de tela do AutoCAD com áreas de influência dos pilares



Fonte: O autor (2022).

O programa também auxiliou na determinação das áreas de influência de cada pilar, que são destacadas em amarelo, a seguir é mostrado na Tabela 6 o valor de cada uma dessas áreas.

Tabela 6 – Relação de área de influência por pilar

Pilar	Área de influência (m ²)
P1	3,01
P2	5,59
P3	6,13
P4	5,38
P5	5,38
P6	3,55
P7	8,37
P8	13,20
P9	13,20
P10	7,25
P11	7,25
P12	4,79
P13	7,50
P14	7,50
P15	6,24
P16	1,63
P17	5,07
P18	16,79
P19	14,16
P20	8,35
P21	5,27
P22	1,63
P23	12,72
P24	12,72
P25	2,46
P26	6,37
P27	6,37
P28	2,46
P29	2,06
P30	2,06

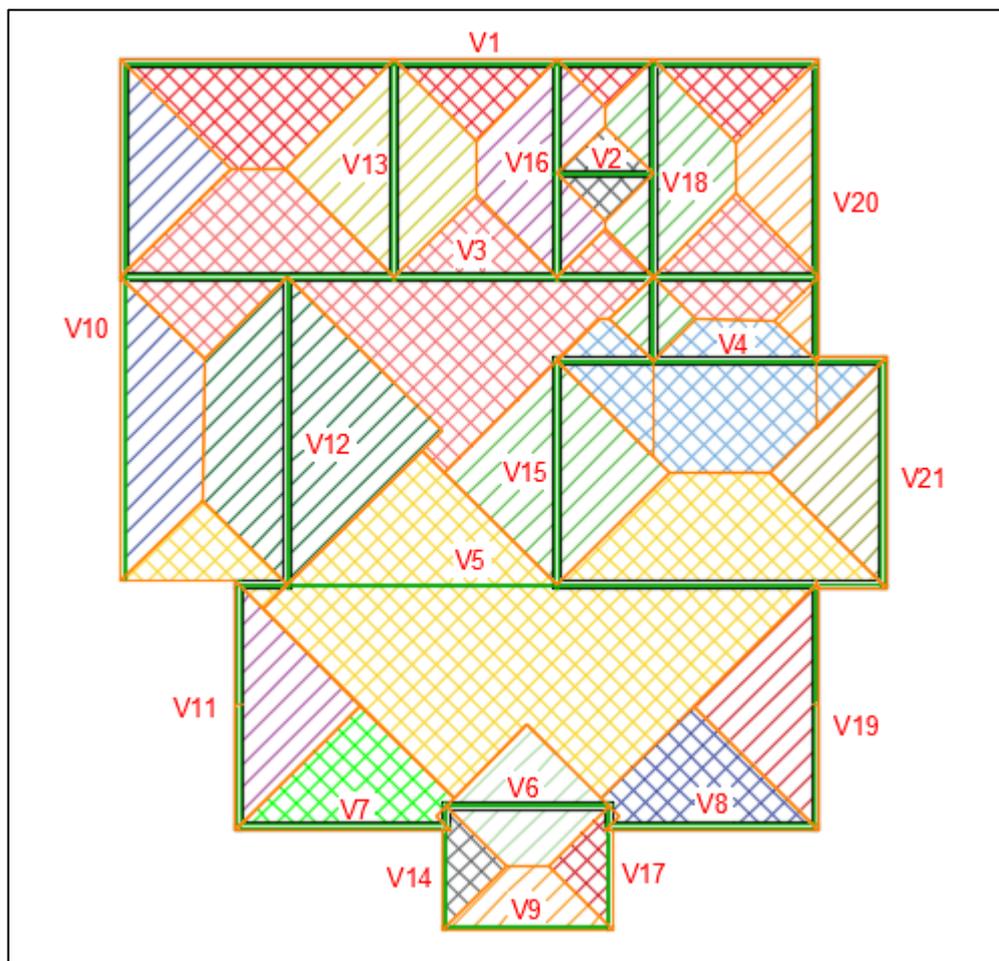
Fonte: O autor (2022).

Conforme observado na tabela de áreas de influência dos pilares, a menor das áreas chegou à 1,63 m² enquanto a maior à 16,79 m². As áreas de influência dos pilares em específico não terão uma utilização direta no dimensionamento realizado neste trabalho, contudo, é interessante sua determinação para realizar uma análise

do projeto. Caso houvesse a necessidade de aumentar o número de pilares, é interessante que haja uma verificação dessas áreas, ou até mesmo, de como os esforços estão atuando em cada elemento.

Foi realizada também a análise das áreas de influência das vigas mostradas em laranja a seguir, que foram alocadas planejando dimensões de 5 cm x 20 cm, de maneira análoga aos pilares, as vigas foram posicionadas nos mesmos locais das vigas do projeto base, sua distribuição de áreas pode ser observada na Figura 27, que recebeu um sistema de hachuras semelhante aos pilares.

Figura 27 – Captura de tela do AutoCAD com áreas de influência dos pilares



Fonte: O autor (2022).

Como o objetivo deste trabalho é dimensionar a estrutura principal da edificação, constituída por vigas e pilares, a determinação das áreas de influência das vigas foram simplificadas. Uma vez que o dimensionamento das lajes não engloba o escopo deste trabalho, atribuiu-se a cada uma das lajes do projeto bordas

simplesmente apoiadas. Isso tudo para adotar a mesma inclinação de discriminação de áreas pelo método das charneiras plásticas (LAJES, 2022), pois no projeto base não estava discriminado a forma de apoio de cada laje. Visto que essa consideração poderia ir contra a segurança da estrutura, foi adotado um fator de segurança de 1,2 pelo autor do trabalho, para a consideração das cargas distribuídas atuantes em cada viga, a fim de ponderar essa consideração em favor da estabilidade da construção.

A seguir é mostrada na Tabela 7, a relação das áreas de influência para cada viga. Houve variações consideráveis entre os valores, pois nas considerações do projeto base, algumas vigas compreendiam a mesma extensão da residência, enquanto outras não, sendo que a menor das áreas resultou em 1,56 m², enquanto a maior em 42,62 m².

Tabela 7 – Relação de área de influência por viga

Viga	Área de influência (m ²)
V1	12,62
V2	1,71
V3	29,46
V4	11,81
V5	42,62
V6	4,80
V7	5,57
V8	5,57
V9	2,56
V10	11,37
V11	5,88
V12	16,13
V13	8,64
V14	1,56
V15	9,46
V16	6,37
V17	1,56
V18	6,41
V19	5,88
V20	4,21
V21	5,06

Fonte: O autor (2022).

Com o auxílio do *software* ftool, foi possível determinar os diagramas a que cada viga se submete, para aplicação das cargas distribuídas na viga. A área de influência foi multiplicada pela carga do telhado de 1,75 kN/m² determinada anteriormente, e o valor foi dividido pela extensão da viga. Vale ressaltar que é utilizada a área de influência de cada trecho da viga, e nesse primeiro trecho, a área de influência é de 3,52 m², que foi determinada com auxílio do programa autoCAD da Autodesk com a elaboração da Figura 27 mostrada anteriormente.

Em adição a essa carga, também foi acrescentado o peso próprio, que é calculado a partir do produto do volume da viga, sua densidade e aceleração da gravidade, mas para a obtenção de uma carga distribuída esse último valor precisa ser dividido pelo comprimento da viga. Um detalhe importante de destacar é que essa carga exercida pelo peso próprio e pela carga do telhado é multiplicada por 1,3, que é um coeficiente de ponderação devido a combinação de ações (ABNT, 2022). Vale ressaltar também que o coeficiente de 1,2 que foi adotado devido a configuração das charneiras englobo todo o valor de carga, portanto, multiplica toda a expressão. A seguir é mostrado como foi determinada a carga no primeiro trecho da viga V1, para possibilitar usar o valor calculado no programa.

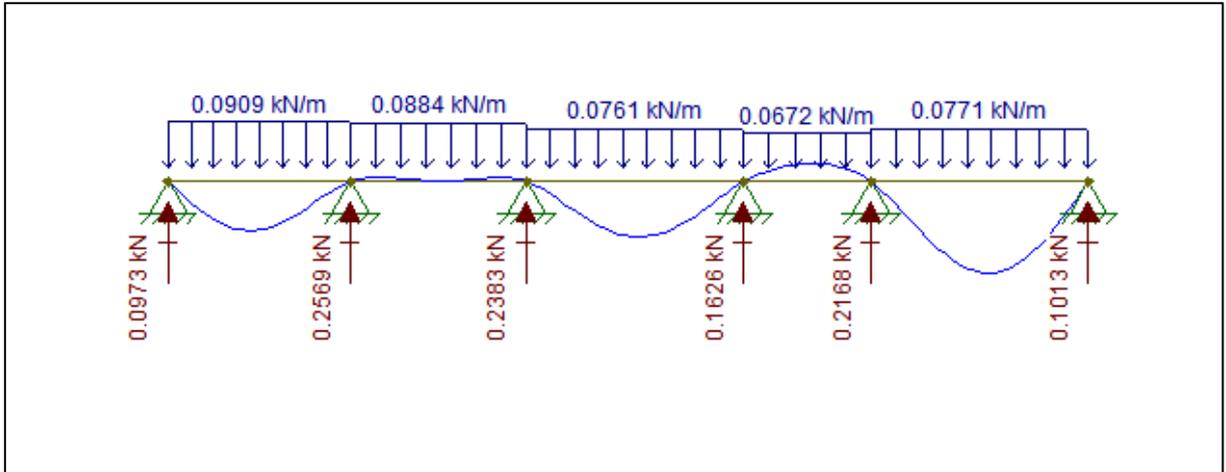
$$q_1 = 1,2 \cdot \left[1,3 \cdot \left(\frac{Carga_{telhado} \cdot A_{influência}}{l_{viga}} + \frac{V_{viga} \cdot densidade}{l_{viga}} \right) \right]$$

$$q_1 = 1,2 \cdot \left[1,3 \cdot \left(\frac{1,75 \cdot 3,52}{2,60} + \frac{(0,05 \cdot 0,20 \cdot 2,60) \cdot 350}{2,60} \right) \right] \rightarrow q_1 = 9,156 \text{ kg/m}$$

$$q_1 = = 0,0916 \text{ kN/m}$$

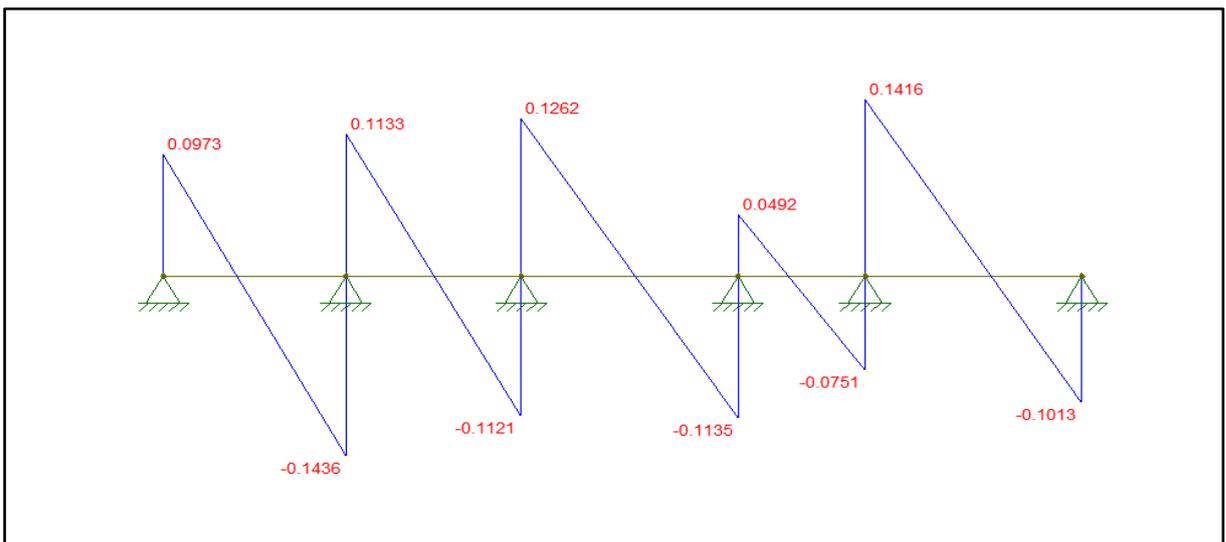
Este procedimento foi realizado para cada trecho da viga V1 a fim de determinar qual o valor da carga distribuída em vigor, as Figuras 28, 29 e 30 mostradas a seguir ilustram os diagramas da viga abordada, na Figura é apresentada a viga com as cargas que foram inseridas no programa, e respectivas reações de apoio.

Figura 28 – Configuração deformada da viga, com apresentação do carregamento em kN/m e reações de apoio em kN



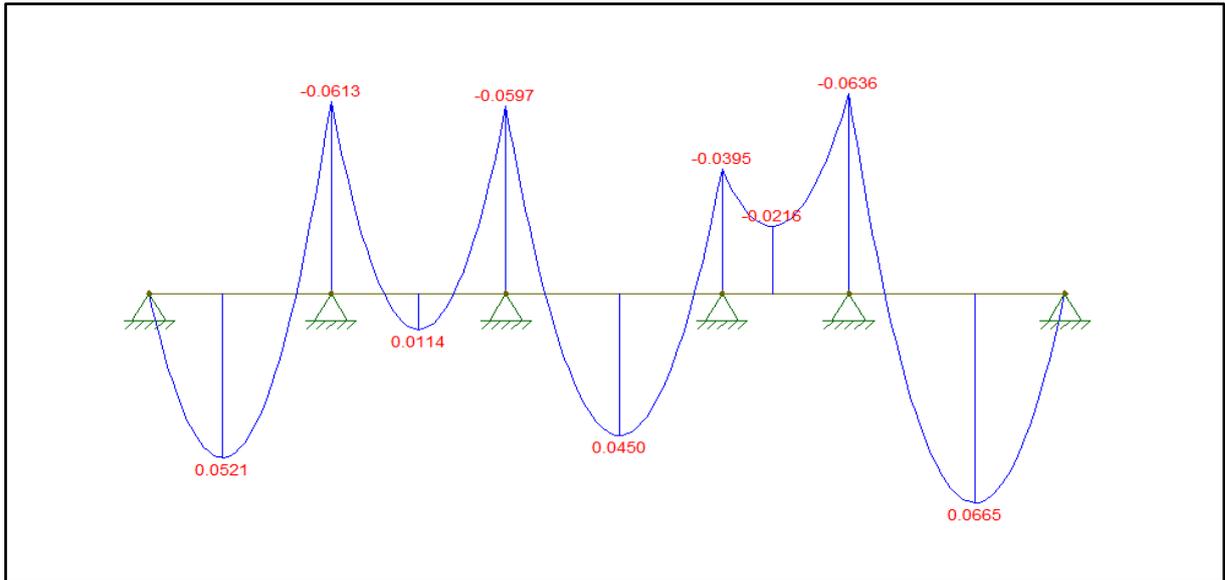
Fonte: o autor (2022).

Figura 29 – Diagrama de esforço cortante da viga V1 no programa ftool, em kN



Fonte: o autor (2022).

Figura 30 – Diagrama de momento fletor da viga V1 no programa ftool, em kN.m



Fonte: O autor (2022).

Analisando os diagramas é possível observar que na viga V1 o maior valor de momento resultou em 0,619 kN.m, o esforço cortante de maior intensidade possui valor de 0,1321 kN e a maior reação de apoio ocorre no pilar P2, com o valor de 0,2331 kN. Utilizando o programa ftool, foi também determinado o valor da flecha a partir da configuração deformada, no caso da viga V1, o maior valor de flecha foi de 0,3597 mm. Realizando o mesmo procedimento para as outras vigas, foi elaborada a Tabela 8, mostrada a seguir, que relaciona a maior reação de apoio, esforço cortante e momento fletor de cada viga, em intensidade, para auxiliar na seleção do caso que exerce a maior solicitação na peça.

Tabela 8 – Relação de esforço cortante, momento fletor e reação de apoio para as vigas de Pinus

Resumo – Vigas de Pinus			
Viga	Vmax	Mmax	Rmax
V1	-0,1436	0,0665	0,2569
V2	0,0739	0,0342	0,0739
V3	0,2374	0,1022	0,3497
V4	0,1999	-0,0867	0,3322
V5	-0,4431	-0,3273	0,8014
V6	0,1515	0,1193	0,1515
V7	0,1852	0,1852	0,1852
V8	0,1852	0,1852	0,1852
V9	0,1210	0,0953	0,1210
V10	-0,3085	-0,3027	0,5557
V11	-0,1313	-0,0613	0,2607
V12	0,3840	0,5760	0,3840
V13	0,2312	0,2398	0,2312
V14	-0,2391	0,0941	0,2341
V15	0,2480	0,2696	0,2480
V16	0,0239	0,2840	0,2385
V17	-0,2391	0,0941	0,2341
V18	0,2869	-0,1982	0,4706
V19	-0,1313	-0,0613	0,2607
V20	0,2029	-0,1332	0,3387
V21	0,1879	0,2044	0,1879

Fonte: O autor (2022).

Uma análise da tabela apresentada, mostra que os valores que mais solicitam as peças de madeira de pinus são, em módulo, de $V_{\max} = 0,4431$ kN como esforço cortante da viga V5, $M_{\max} = 0,576$ kN.m como momento fletor da viga V12 e $R_{\max} = 0,8014$ kN como uma das reações de apoio da viga V5.

Quanto aos valores das flechas, a norma ABNT NBR 7190:2022 estabelece que para vigas biapoiadas ou contínuas, o valor limite de deslocamento da flecha resultante final deve estar contido no limite de $L/250$ a $L/350$. Considerando o vão de 3,15 m da parte que ocorre o maior valor de flecha na viga V1, e adotando o valor de $L/350$ em favor da segurança, para o valor limite de flecha, observa-se que a flecha obtida está em conformidade com a norma, pois o valor limite determinado foi de 9 mm, enquanto a flecha máxima encontrada no diagrama foi de aproximadamente 0,36 mm.

Realizando o mesmo procedimento, foi comparado o valor da flecha com o limite, para cada uma das vigas, gerando a Tabela 9, mostrada a seguir:

Tabela 9 - Relação do valor de flecha com o deslocamento limite em cada viga

Viga	L (m)	L/350 (mm)	flecha (mm)
V1	3,15	9,00	0,36
V2	1,85	5,29	0,07
V3	3,15	9,00	0,56
V4	3,15	9,00	0,33
V5	5,20	14,86	3,32
V6	3,15	9,00	0,74
V7	4,00	11,43	0,19
V8	4,00	11,43	0,19
V9	3,15	9,00	0,59
V10	6,00	17,14	0,47
V11	2,37	6,77	0,09
V12	6,00	17,14	12,96
V13	4,15	11,86	2,58
V14	1,95	5,57	0,32
V15	4,35	12,43	3,19
V16	2,15	6,14	2,90
V17	1,95	5,57	0,32
V18	2,15	6,14	1,64
V19	2,37	6,77	0,09
V20	4,15	11,86	1,06
V21	4,35	12,43	2,42

Fonte: O autor (2022).

Analisando a intensidade da flecha, observa-se que o valor que chegou mais perto do limite foi na viga V12, onde obteve-se uma flecha de 12,96 mm, sendo o valor limite de 17,14 mm. A análise dos valores de flecha não foi feita para a madeira de eucalipto, visto que nela, os valores de flecha seriam menores devido as características de resistência da espécie.

4.4.1 Vigas

4.4.1.1 Flexão

Para as vigas, foi feita a verificação quanto aos esforços considerando os casos de maior solicitação da peça, pois ao atender o caso mais crítico, automaticamente os outros estão em conformidade com a norma, para a verificação à flexão, o valor da tensão atuante, foi determinado conforme a equação (3), mostrada na revisão bibliográfica.

$$\sigma_{Md} = \frac{576000 \cdot \frac{200}{2}}{\frac{50 \cdot 200^3}{12}} \rightarrow \sigma_{Md} = 1,728 \text{ MPa} \quad (\text{como } \sigma_{Md} < 5,4 \text{ MPa, ok})$$

Como já houve a ponderação pelo coeficiente 1,3, o valor de M_d é abordado como o maior valor das solicitações mostradas previamente, ou seja, 0,576 kN . m, ou 576000 N.mm.

4.4.1.2 Cisalhamento

Também foi realizada a verificação quanto ao cisalhamento nas vigas, a expressão mostrada na sequência é a equação (4), ela aborda o esforço cortante em sua utilização, sendo que o caso em que ocorre uma maior solicitação é de 0,4431 kN, ou 443,1 N.

$$\tau_d = 1,5 \frac{443,1}{50 \cdot 200} = 0,066 \text{ MPa} \quad (\text{como } \tau_d < 0,75 \text{ Mpa, ok})$$

4.4.2 Pilares

Para a realização das verificações, também foi escolhido o caso mais crítico dos pilares apenas para simplificar os procedimentos, visto que se ele obedecer às restrições impostas pela norma, os outros pilares também estarão em conformidade, nesse sentido, foi escolhido o pilar com reação de 0,8014 kN, referente à viga V5, pois sua reação de apoio é a maior.

4.4.2.1 Verificação da tensão de compressão

Para realizar a verificação da tensão de compressão, o valor de cálculo da tensão de compressão normal em relação à seção transversal ($\sigma N_{c,d}$) foi determinado. Vale destacar que o valor de cálculo da compressão paralela as fibras ($f_{c0,d}$) para a madeira de pinus equivale a 5,4 MPa, ela é satisfeita como demonstrado na sequência baseada na equação (5):

$$\sigma N_{c,d} = \frac{801,4}{(150 \cdot 150)} = 0,036 \text{ Mpa} \quad (\text{como } \sigma N_{c,d} < 5,4 \text{ MPa, ok})$$

4.4.2.2 Análise de estabilidade

A análise de estabilidade de pilares aborda índices de esbeltez. Primeiramente é determinado o comprimento de flambagem conforme a equação (6) presente na revisão bibliográfica. Para todos os pilares analisados em projeto, o valor de K_e é de 1,0, considerando os mesmos biapoiados, conforme a recomendação da ABNT NBR 7190:2022.

$$L_0 = 1,0 \cdot 3,0 \rightarrow L_0 = 3,0 \text{ m}$$

Realizando as devidas substituições na equação para determinação da esbeltez, procede-se com a utilização da equação (7):

$$\lambda = \frac{3}{\sqrt{\frac{0,15 \cdot 0,15^3}{12} / (0,15^2)}} \rightarrow \lambda = 69,282 \quad (\text{como } \lambda < 140 \text{ ok})$$

4.4.2.3 Esbeltez relativa

Como todos os pilares considerados possuem formato quadrado, os dois índices de esbeltez relativa são iguais, pois as equações (8) e (9) ficam idênticas após as substituições com seções quadradas, elas procedem com:

$$E_{0,05} = 0,7 \cdot E_{co,med} = 0,7 \cdot 5000 \rightarrow E_{0,05} = 3500 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,x} = \lambda_{rel,y} = \frac{69,282}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{14}{3500}} \rightarrow \lambda_{rel,x} = \lambda_{rel,y} = 1,395$$

4.4.2.4 Condição de estabilidade para peças comprimidas

Como os índices de esbeltez relativa resultaram em um valor superior à 0,3 em intensidade, é necessário realizar mais uma verificação:

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cx} \cdot f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + K_M \cdot \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad e \quad \frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cy} \cdot f_{c0,d}} + K_M \cdot \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

Há a necessidade de satisfazer as inequações apresentadas, que são as mesmas das equações (10) e (11) do capítulo 2. Nelas K_m é um coeficiente, que segundo a ABNT NBR 7190:2022, para seções retangulares equivale à 0,7, $f_{m,d}$ para a madeira de pinus equivale a 5,4 MPa, enquanto $f_{c0,d}$ também é 5,4 MPa, e $\sigma_{Nc,d}$ foi determinado previamente e resultou em 0,036 MPa. Já $\sigma_{Mx,d}$ e $\sigma_{My,d}$ são referentes à elementos flexocomprimidos, no caso de existir flexão oblíqua decomposta nos eixos x e y . Como no presente caso o pilar é submetido à flexão simples, ambas as incógnitas são nulas.

Os coeficientes k_{cx} e k_{cy} coeficientes que precisam da determinação dos valores de k_x e k_y , como mostrado nas equações (12) e (13) da revisão bibliográfica. Nessas equações, β_c é o fator de peças estruturais, que para peças de madeira maciça serrada, equivale à 0,2, $\lambda_{rel,x}$ e $\lambda_{rel,y}$ já foram determinados anteriormente, e ambos possuem o valor de 1,395, que fazendo as devidas substituições nas equações (14) e (15), procedem com:

$$k_x = k_y = 0,5 \cdot [1 + 0,2 \cdot (1,395 - 0,3) + (1,395)^2] \rightarrow k_x = k_y = 1,5825$$

Com esses valores determinados, é possível calcular os coeficientes k_{cx} e k_{cy} conforme:

$$k_{cx} = k_{cy} = \frac{1}{1,5825 + \sqrt{(1,5825)^2 - (1,395)^2}} \rightarrow k_{cx} = k_{cy} = 0,4292$$

Como a peça analisada não está sendo flexocomprimida, $\sigma_{Mx,d} = \sigma_{My,d} = 0$. Substituindo os valores na inequação, confere-se:

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cy} \cdot f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + K_M \cdot \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} = \frac{0,036}{0,4292 \cdot 5,4} + \frac{0}{5,4} + 0,7 \cdot \frac{0}{5,4} = 0,0155 \text{ (como o valor é } < 1, \text{ ok)}$$

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cy} \cdot f_{c0,d}} + K_M \cdot \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} = \frac{0,036}{0,4292 \cdot 5,4} + 0,7 \cdot \frac{0}{5,4} + \frac{0}{5,4} = 0,0155 \text{ (como o valor é } < 1, \text{ ok)}$$

As inequações foram verificadas, portanto, a peça conferiu sua estabilidade conforme a norma, é válido destacar que essa verificação foi favorecida pelas

condições adotadas, pois não havendo o fator da flexocompressão, a estabilidade é atingida com maior facilidade, conforme observou-se nas inequações.

4.5 CONSIDERAÇÕES DAS SEÇÕES DAS PEÇAS

4.5.1 Madeira de Pinus

Observa-se que as dimensões adotadas para as peças favoreceram a segurança, utilizando o *software* Excel, houve a possibilidade de adaptar as dimensões de cada peça, com o intuito de conferir seções menores das vigas e pilares e ainda providenciar uma estrutura estável. Constatou-se que seria possível a utilização com segurança para a madeira de pinus de uma seção da viga de 5 x 15 cm, sendo que uma seção de 5 x 10 cm não satisfaz a verificação de flexão, enquanto para o pilar, uma de seção 10 x 10 cm (tecnicamente seria possível o uso de uma seção de 7,5 x 7,5 cm, mas verificou-se que essa não é uma seção usual dos fornecedores de peças de madeira da região).

Como esta sendo adotada seção de pilar quadrada, os valores dos índices de esbeltez nos eixos x e y são iguais, e as inequações estão resultando em valores iguais também. Para evitar repetição dos procedimentos seguidos nas equações, a seguir estão os valores obtidos por meio do programa Excel, mostrados na Tabela 10, para seção de viga de 5 x 15 cm e de pilar de 10 x 10 cm.

Tabela 10 – Relação de valores obtidos para cada verificação com seção de viga de 5 x 15 cm e de pilar de 10 x 10 cm para a madeira de pinus

Verificação	Valor obtido
σ_{Md} (flexão, < 5,4 MPa)	3,072 MPa
τ_d (cisalhamento, < 0,75 MPa)	0,089 MPa
$\sigma_{N_{c,d}}$ (compressão, < 5,4 MPa)	0,080 MPa
$\lambda_x = \lambda_y$ (< 140)	103,923
Inequações (< 1)	0,072

Fonte: O autor (2022).

4.5.2 Madeira de Eucalipto

Com considerações semelhantes, o dimensionamento da madeira de eucalipto seguiu os mesmos procedimentos na realização do dimensionamento, contudo, é

valido ressaltar que as solicitações máximas em cada viga foram diferentes, conforme é mostrado na Tabela 11, a seguir:

Tabela 11 – Relação de esforço cortante, momento fletor e reação de apoio para as vigas de Eucalipto

Resumo – Vigas de Eucalipto			
Viga	Vmax	Mmax	Rmax
V1	0,1847	0,0865	0,3228
V2	0,0956	0,0442	0,0956
V3	0,2745	0,1222	0,4081
V4	0,2371	-0,1037	0,4002
V5	-0,502	-0,3689	0,9059
V6	0,1884	0,1483	0,1884
V7	0,232	0,232	0,232
V8	0,232	0,232	0,232
V9	0,1578	0,1243	0,1578
V10	-0,3925	-0,3855	0,7082
V11	-0,1659	-0,0774	0,3295
V12	0,4542	0,6813	0,4542
V13	0,2797	0,2902	0,2797
V14	-0,2906	0,1455	0,2906
V15	0,2988	0,325	0,2988
V16	0,2983	0,3568	0,2983
V17	-0,2906	0,1455	0,2906
V18	0,3589	-0,2487	0,5625
V19	-0,1659	-0,0774	0,3295
V20	0,2607	-0,1716	0,439
V21	0,2388	0,2597	0,2388

Fonte: O autor (2022).

Uma análise da tabela apresentada, mostra que os valores que mais solicitam as peças de madeira de eucalipto são, em módulo, de $V_{\max} = 0,502$ kN como esforço cortante da viga V5, $M_{\max} = 0,6813$ kN.m como momento fletor da viga V12 e $R_{\max} = 0,9059$ kN como uma das reações de apoio da viga V5.

Dando continuidade para a etapa de dimensionamento, constatou-se que para a madeira de Eucalipto, poderiam ser utilizadas vigas de seção 5 x 10 cm, e pilares de 10 x 10 cm, sendo os valores obtidos estabelecidos na Tabela 12, mostrada na sequência.

Tabela 12 – Relação de valores obtidos para cada verificação com seção de viga de 5 x 10 cm e de pilar de 10 x 10 cm para a madeira de eucalipto

Verificação	Valor obtido
σ_{Md} (flexão, < 11,57 MPa)	8,176 MPa
τ_d (cisalhamento, < 1,2 MPa)	0,151 MPa
$\sigma_{N_{c,d}}$ (compressão, < 9,64 MPa)	0,091 MPa
$\lambda_x = \lambda_y$ (< 140)	103,923
Inequações (< 1)	0,037

Fonte: O autor (2022).

4.6 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A madeira atendeu às exigências que a norma ABNT NBR 7190:2022 estabelece, sendo que como num primeiro dimensionamento as peças estavam superdimensionadas, houve alteração das seções para melhor adequação ao projeto. Foi realizado o dimensionamento para apenas uma viga e um pilar de cada espécie de madeira, analisando a situação menos favorável à segurança da edificação, pois assim, ao atender essas condições, o dimensionamento para os demais elementos também será satisfatório. É importante destacar que ao favorecer a segurança no dimensionamento, a economia é deixada em segundo plano, sendo que esses critérios costumam influenciar um ao outro de em dimensionamentos, por meio de limitações, ou seja, quanto maior a economia almejada, menor seria a segurança, pois para aumentar o critério econômico, seriam usadas peças de seções menores, por exemplo.

Houve alterações no dimensionamento de elementos comprimidos na norma ABNT NBR 7190:1997 para a versão atual, o que levou a mudanças notáveis de dimensionamento principalmente dos pilares. Na versão anterior de 1997, o dimensionamento era tratado a partir de excentricidades, similares à ABNT NBR 6118:2014 Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos. Essas excentricidades eram dadas em função da esbeltez do pilar.

Os elementos de vigas também atenderam aos requisitos normativos de segurança. Importante ressaltar que na atualização da norma, a tensão normal atuante deve ser menor que a resistência à flexão ($f_{m0,d}$) ou à compressão ($f_{c0,d}$). Na versão antiga, a tensão atuante deveria ser menor que a resistência à compressão e à tração da madeira.

De forma geral, mesmo a madeira de pinus, que não é uma espécie com altas resistências, foi suficiente para os carregamentos de projeto adotados. Como o projeto em questão é uma estrutura simples, os carregamentos também não são altos, o que no caso permitiu a utilização de peças de seção transversal relativamente pequena, se comparar com o mínimo exigido para os elementos em construções de concreto armado. Para uma estrutura de maior porte, seria recomendado uma madeira com características estruturais mais robustas, como o Ipê, por exemplo.

Por fim, foi elaborada uma prancha de detalhamento no final deste documento, logo após as referências, em folha A3 para esclarecer a determinação final do dimensionamento das peças estruturais. Em prancha, são mostradas as cotas para a localização de cada elemento, bem como considerações das dimensões das peças ou do desenho.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho se propôs a dimensionar uma estrutura em madeira, a partir de um projeto concebido originalmente para ser feito de concreto armado e alvenaria convencional. A madeira foi escolhida com base em uma pesquisa regional em empresas do ramo.

O trabalho foi elaborado com base nos preceitos da recém atualizada ABNT NBR 7190:2022, cujo processo de dimensionamento ainda não havia sido publicado por nenhuma bibliografia até o momento da confecção deste trabalho. Avaliar uma normativa de dimensionamento estrutural recém incluída no mercado da engenharia civil tratou de um desafio particular do trabalho aqui apresentado.

De forma geral, a estrutura dimensionada no presente trabalho atendeu aos esforços previstos para atuação na edificação. Assim, ela concebe segurança com o planejamento atual e pode ser aplicada no projeto estabelecido.

A norma atual, foi dividida em um maior número de seções de forma a atender a demanda que se exigia com relação a versão antiga, estando assim revigorada em relação a seu conteúdo, cabe ressaltar que as mudanças entre as versões impactaram principalmente no dimensionamento dos pilares. Além disso, a nova versão diferencia as principais espécies de madeira em categorias, o que se distingue da versão antiga, que fornecia dados de ensaio para cada uma das espécies, este fator não foi expresso no dimensionamento, pois a norma estabelece uma seção específica para madeiras de pinus e de eucalipto. Essas duas espécies foram selecionadas pois houve concordância por parte da opinião das empresas que possuíam relação com a madeira como material de construção.

Conclui-se que as espécies de madeira adotadas atendem aos requisitos de carregamentos considerados na edificação. As bases de cálculo da nova ABNT NBR 7190:2022 norteiam um dimensionamento objetivo, que foi verificado. A adaptação do projeto original para a madeira se deu de maneira simples e intuitiva, mostrando que, se for conveniente, pode ser executado com segurança.

Como sugestão para trabalhos futuros, destaca-se a utilização de programas, como o CypeCAD, o qual possui extensão para madeira; o dimensionamento da fundação da obra abordada no presente trabalho em madeira; a análise de viabilidade econômica, com a comparação do custo da obra em alguma das espécies de madeira,

com o custo em concreto armado; e o levantamento de técnicas de manutenção para a estrutura de madeira dimensionada.

REFERÊNCIAS

ABRACE. Aline Aparecida da Silva. Ponta Grossa: Associação Abrace o hospital universitário dos Campos Gerais Wallace Thadeu de Mello e Silva, 2020, arquivo “ABRACE.dwg”. Acessível pelo portal de obras públicas de Ponta Grossa.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120 informação e documentação – Ações para o cálculo de estruturas de edificações: apresentação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190 informação e documentação – Projeto de estruturas de madeira: apresentação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BRASIL, F. A. B. et al. **Patologias bióticas em estruturas de madeira: estudo de caso em edificação residencial localizada no Bairro São João Batista, BH/MG**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário UNA, Belo Horizonte, 2021.

BRITO, L. D. **Patologia em estruturas de madeira: metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação**. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CARNEIRO, T. S. **Análise comparativa de custos entre os sistemas construtivos em wood frame e em estrutura de concreto armado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2017.

CHACON, I. M. N. **Estudo sobre o panorama da arquitetura brasileira em madeira: à luz da tectônica e da empatia**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Urbano) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

COSTA, B. P. D.; BESSA, F. C. **Concepção e dimensionamento de pontes em madeira roliça para estradas vicinais na região Sudoeste do Paraná**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.

CRUZ, D. V. **Casas de madeira: Um estudo de caso Brasil e EUA**. 2006. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

DUCATTI, M. A. **Diagnóstico da secagem convencional de madeiras no estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

FREITAS, F. G. C. **Dimensionamento de estrutura composta por perfis e chapas de madeira (Wood Frame)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2018.

JÚNIOR, C. R. C; SILVA W. C. R; SOARES, P. de T. M. L. Uso da madeira na Construção Civil. **Projectus**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 4, p. 79-93, 2017. Disponível em: <https://revistas.unisuam.edu.br/index.php/projectus/article/download/278/112/>. Acesso em 24 mar. 2022.

LAJES maciças – capítulo 11. Disponível em: http://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Lajes/Lajes_Macicas_EESC.pdf. Acesso em: 29 nov. 2022.

MANFRINATO, M. E. **Estudo sobre o uso da madeira para fins estruturais e arquitetônicos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.

MELO, P. R. de. **Pré-dimensionamento de estruturas de madeira, de aço e de concreto para auxílio à concepção de projetos arquitetônicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

MJØSTÅRNET. Disponível em: <https://www.moelven.com/mjostarnet/>. Acesso em 11 jul. 2022.

MODERN TALL WOOD BUILDINGS: OPPORTUNITIES FOR INNOVATION. Minneapolis: Dovetail Partners, 2016-.

OLIVEIRA, T. Y. M. de. **Estudo sobre o uso de materiais de construção alternativos que otimizam a sustentabilidade em edificações**. Projeto de graduação (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

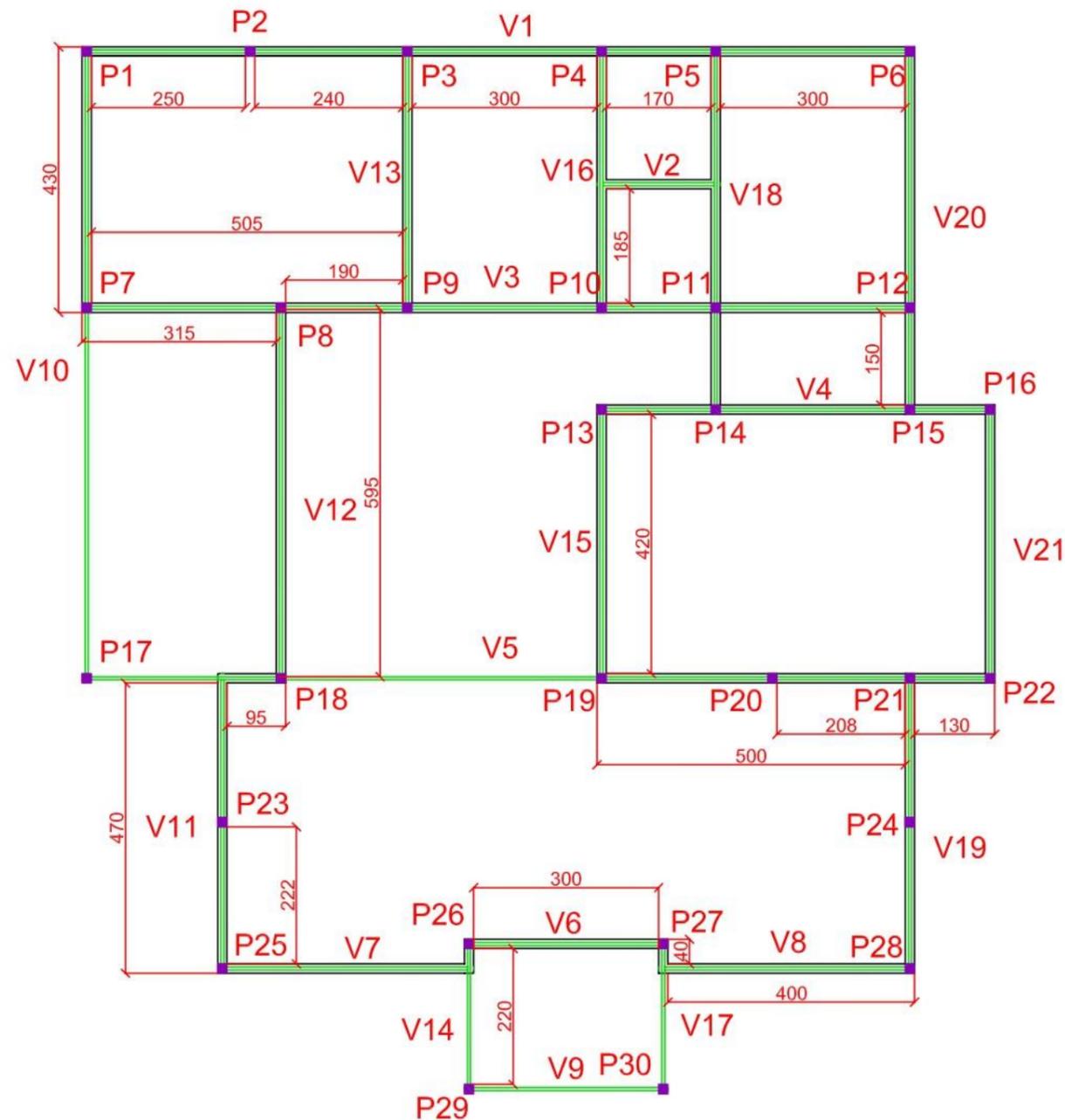
PAESE, M. C. B. **Análise de sistemas construtivos em madeira implantados na região de Curitiba – Paraná**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

PONS, C.; KNOP, A. Construções utilizando estruturas de madeira. **Revista Cippus – Unisalle**, Canoas, v. 8, n. 1, p. 79-96, abr. 2020.

SWEDISH WOOD. **Design of timber structures**: structural aspects of timber construction. 2. ed. Stockholm: Swedish Forest Industries Federation, 2016.

TALL pioneer. Disponível em: <https://www.setragroup.com/en/press/news/tall-pioneer/>. Acesso em 09 jul. 2022.

VIANA, L. D. **Comparativo de custos dos sistemas construtivos wood frame e concreto armado para edifício utilizando BIM 5D**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.



Pinus - Classe 3	
$f_{m,d}$ (MPa)	5,4
$f_{c0,d}$ (MPa)	5,4
$f_{v,d}$ (MPa)	0,75
E_{med} (MPa)	5000
ρ_{12} (kg/m ³)	350

Eucalipto - Classe 3	
$f_{m,d}$ (MPa)	11,571
$f_{c0,d}$ (MPa)	9,643
$f_{v,d}$ (MPa)	1,2
E_{med} (MPa)	11000
ρ_{12} (kg/m ³)	500

Caso de utilização de madeira de pinus		
Elementos	Quantidade	Dimensões (cm)
Pilares	30	10x10x300
Vigas	21	05x15 *

* dimensão de comprimento variada para cada elemento, conforme indicado em desenho

Caso de utilização de madeira de eucalipto		
Elementos	Quantidade	Dimensões (cm)
Pilares	30	10x10x300
Vigas	21	05x10 *

* dimensão de comprimento variada para cada elemento, conforme indicado em desenho

Considerações:

- As tabelas ilustradas abordam as considerações com a utilização de madeira de pinus ou de eucalipto, onde as dimensões de cada peça estão indicadas em cada tabela, o posicionamento das vigas e pilares obedece a planta baixa da estrutura principal independente da espécie analisada.
- Todas as vigas ilustradas possuem dimensões de 5 x 15 cm em caso de utilização de madeira de pinus, de 5 x 10 cm em caso de madeira de eucalipto, enquanto todos os pilares, dimensões de 10 x 10 cm;
- Planta com estrutura principal para madeira de pinus classe 3, ou eucalipto classe 3, conferir características conforme quadro vinculado;
- Medidas do desenho em centímetros.

1

PLANTA BAIXA DA ESTRUTURA PRINCIPAL

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA

Acadêmico: Bruno Leonardo Nunes

RA: 18032921

Título: Adaptação da casa da acolhida

Disciplina: TCC

Curso: Engenharia Civil

Folha:

Escalas: 1:100

Data: 05/12/2022

01/01