



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LUIZ CARLOS LIRA DOS SANTOS

**CÁLCULO E VERIFICAÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE UM EDIFÍCIO
DE MADEIRA DE ACORDO COM A NBR 7190-1:2022: UM ESTUDO DE CASO**

JOÃO PESSOA
2024

LUIZ CARLOS LIRA DOS SANTOS

CÁLCULO E VERIFICAÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE UM EDIFÍCIO
DE MADEIRA DE ACORDO COM A NBR 7190-1:2022: UM ESTUDO DE CASO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) – Campus I – João Pessoa, como um dos requisitos obrigatórios para a obtenção do título de bacharel em Engenharia civil.

Orientador: Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo

JOÃO PESSOA

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S237c Santos, Luiz Carlos Lira Dos.

CÁLCULO E VERIFICAÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE UM EDIFÍCIO DE MADEIRA DE ACORDO COM A NBR 7190-1:2022: UM ESTUDO DE CASO / Luiz Carlos Lira Dos Santos. - João Pessoa, 2024.

124 f. : il.

Orientação: Givanildo Alves Azeredo.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Madeira. 2. Construção civil. 3. Sustentabilidade. 4. Análise estrutural. 5. Madeira laminada colada (MLC). I. Azeredo, Givanildo Alves. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

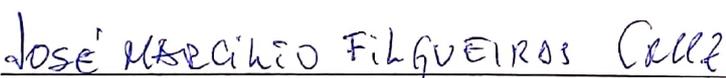
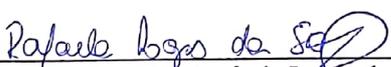
CDU 62(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

LUIZ CARLOS LIRA DOS SANTOS

CÁLCULO E VERIFICAÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE UM EDIFÍCIO DE MADEIRA DE ACORDO COM A NBR 7190-1:2022: UM ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso em 08/05/2024 perante a seguinte Comissão Julgadora:

 _____ Givanildo Alves de Azeredo Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB	<u>APROVADO</u>
 _____ Jose Marcilio Filgueiras Cruz Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB	<u>APROVADO</u>
 _____ M ^e . Rafaela Lopes da Silva Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB	<u>APROVADO</u>

AGREDECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Maria Aparecida, pelos ensinamentos e dedicação na minha educação desde criança, por sempre se fazer presente no meu ciclo acadêmico, mesmo à distância, e pelos ensinamentos de vida, que guardo no coração.

Agradeço ao meu pai, Luiz Antônio, por sempre tentar me ajudar na medida do possível, pelos esforços durante minha graduação e por me inspirar a seguir seu exemplo de homem íntegro.

Agradeço aos meus irmãos, Cauã e Caio, pelo companheirismo e carinho durante esta jornada, sempre solícitos e compreensivos.

Agradeço aos meus avós, por estarem presentes em minha vida e me ensinarem a viver, por serem exemplos de superação, companheirismo, amor e solidariedade.

Agradeço à minha namorada, Maria Victoria, pela compreensão e companheirismo, por me oferecer suporte emocional e me motivar a fazer planos para o futuro.

Agradeço à minha família, que sempre acreditou em mim e contribuiu para minha formação profissional.

Agradeço ao meu orientador, Givanildo, pela paciência e consideração, por me ajudar neste trabalho.

Agradeço aos meus professores, pelos conhecimentos transmitidos e pelas possibilidades criadas em minha vida.

RESUMO

A construção civil é um dos setores mais poluentes do mundo, responsável por mais de 30% das emissões globais de dióxido de carbono, principalmente devido à extração e processamento de materiais tradicionais como concreto e aço. Em contraste, a madeira, um dos materiais de construção mais antigos, surge como uma excelente alternativa ambiental quando extraída de forma sustentável. Este material requer menos energia e produz menos emissões de carbono durante sua fabricação. Adicionalmente, com técnicas modernas de processamento industrial, é possível fabricar peças estruturais robustas e duráveis.

No entanto, o uso estrutural da madeira ainda é pouco explorado no Brasil. Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar o cálculo e verificação de um edifício residencial de quatro pavimentos utilizando madeira laminada colada (MLC). Durante o desenvolvimento deste projeto, foram realizados estudos sobre as cargas, propriedades de resistência e peculiaridades construtivas do material. O dimensionamento segue a norma ABNT NBR 7190:2022, e um software computacional foi utilizado para a análise estrutural. Os resultados obtidos confirmam que a madeira MLC resiste adequadamente aos esforços solicitantes e atende aos critérios de deformações, demonstrando ser uma alternativa sustentável viável em comparação aos materiais tradicionais.

Palavras-chave: Madeira; Construção civil; Sustentabilidade; Análise estrutural; Madeira laminada colada (MLC)

ABSTRACT

The construction industry is one of the most polluting sectors in the world, responsible for over 30% of global carbon dioxide emissions, mainly due to the extraction and processing of traditional materials such as concrete and steel. In contrast, wood, one of the oldest building materials, emerges as an excellent environmental alternative when sustainably harvested. This material requires less energy and produces fewer carbon emissions during its manufacture. Additionally, with modern industrial processing techniques, it is possible to produce robust and durable structural pieces. However, the structural use of wood is still underexplored in Brazil. Thus, this work aims to present the calculation and verification of a four-story residential building using glued laminated timber (GLT). During the development of this project, studies were conducted on the loads, resistance properties, and construction peculiarities of the material. The design follows the ABNT NBR 7190:2022 standard, and computational software was used for structural analysis. The results obtained confirm that GLT wood adequately withstands the demanding forces and meets deformation criteria, proving to be a viable sustainable alternative compared to traditional materials.

Keywords: Wood; Construction sector; Sustainability; Structural analysis; Glued laminated timber (GLT)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Habitações feitas de taipa e madeira	13
Figura 2 - Uso da madeira em canteiro de obras	13
Figura 3 - Ascet, EUA.....	14
Figura 4 - Mjøstårnet, Noruega	15
Figura 5 – Detalhe de viga secundárias.....	17
Figura 6 - Estruturas de contraventamento	17
Figura 7 - Peça em MLC curva.....	18
Figura 8 - Estrutura em MLC.....	19
Figura 9 - Camadas de vedação com placa OSB	20
Figura 10 - Planta baixa do edifício	23
Figura 11 - Corte A-A	23
Figura 12 - Corte B-B	24
Figura 13 - Mão-francesa em estrutura de telhado	25
Figura 14- Cargas admissíveis nas lajes.....	25
Figura 15 - Identificação de eixos e elementos estruturais	26
Figura 16 - Identificação dos elementos no nível do reservatório	26
Figura 17 - Estrutura do edifício em 3d	27
Figura 18 - Pórtico do eixo 0	27
Figura 19 - Pórtico do eixo 1	28
Figura 20 - Pórtico do eixo 2	28
Figura 21- Pórtico do eixo 3	29
Figura 22 - Pórtico do eixo 4	29
Figura 23 - Pórtico do eixo 5	30
Figura 24 - Pórticos do eixo A, B, E e F	30
Figura 25 - Pórtico do eixo C e D	31
Figura 26 - Paredes aplicadas em laje no pavimento.....	35
Figura 27 - Cargas das paredes no pavimento tipo.....	36
Figura 28 - Distribuição das cargas de piso nas vigas principais	37
Figura 29 - Estrutura da escada	38
Figura 30 - Distribuição das cargas de piso na escada	38
Figura 31 - Cargas da caixa d'água nas vigas principais	40
Figura 32 - Distribuição das cargas de utilização do ambiente nas vigas principais	41
Figura 33 - Distribuição das cargas de utilização da escada	42
Figura 34 - Fatores para obtenção de S2.....	44
Figura 35 - Ábaco de obtenção do coeficiente de arrasto	47
Figura 36 - Área frontal efetiva dos pavimentos	47
Figura 37 - Distribuição da carga do vento a 90° na estrutura principal	50
Figura 38 - Distribuição da carga do vento a 0° na estrutura principal	50
Figura 39 - Coeficientes de ponderação das cargas variáveis	52
Figura 40 - Valores de Kmod1	55
Figura 41 - Fatores de Kmod2.....	55
Figura 42 - Valores de classe de umidade	56
Figura 43 - Valores de coeficiente de alteração devido a temperatura (CT)	56

Figura 44 - Coeficientes de flambagem.....	61
Figura 45 - Valores Tabelados para o coeficiente de correção	63
Figura 46 - Flambagem lateral com torção.....	63
Figura 47 - Flechas máximas permissíveis atuantes.....	64
Figura 48 - Propriedades da madeira ELU.....	67
Figura 49 Propriedades da madeira ELS	67
Figura 50 - Propriedades da ligação da madeira.....	68
Figura 51- Combinações de ações de cálculo consideradas	69
Figura 52 - Dados de entrada da planilha de cálculo	69
Figura 53- Resultados disponível na planilha de cálculo.....	70
Figura 54- Identificação de viga crítica à momento e a cortante	71
Figura 55- Esforços solicitantes de cálculo da viga crítica à momento	72
Figura 56 - Viga crítica a esforços normais	77
Figura 57- Esforços solicitantes da viga crítica a esforços normais	77
Figura 58- Viga de piso crítica do pavimento tipo.....	85
Figura 59- Viga de piso crítica do reservatório	86
Figura 60- Pilar crítico p16	94
Figura 61- Esforços solicitantes do pilar crítico P16.....	94
Figura 62- Esforços solicitantes do pilarete.....	100
Figura 63- Esforços solicitantes da mão francesa mais solicitada à compressão ...	106
Figura 64 - Esforços solicitantes da mão francesa mais solicitada à tração	107
Figura 65- Estrutura deformada	115
Figura 66- Viga com flecha máxima atuante	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de resistência característica da madeira D30	31
Tabela 2 - Propriedades geométricas das peças estruturais	32
Tabela 3 - Carga das paredes.....	35
Tabela 4 - Cargas das paredes apoiadas em lajes	36
Tabela 5 - Cargas de piso	37
Tabela 6 - Cargas da caixa d'água.....	39
Tabela 7 - Cargas variáveis dos ambientes	40
Tabela 8 - Valores de S2	44
Tabela 9 - Valores do vento característico	45
Tabela 10 - Valores da pressão dinâmica do vento	45
Tabela 11 - Valores da área frontal efetiva	47
Tabela 12 - Valores do coeficiente de arrasto	48
Tabela 13 - Valores da força do vento a 0°	48
Tabela 14 - Valores da força do vento a 90°	49
Tabela 15 - Fatores de combinação de cargas considerados.....	52
Tabela 16 - Propriedades da madeira de cálculo da madeira para ELU	65
Tabela 17 - Propriedades de cálculo da madeira para ELS	66
Tabela 18 - Resumo de cálculo da viga V18.....	75
Tabela 19 - Verificações viga V21 à compressão	83
Tabela 20 - Verificações viga V21 à tração.....	84
Tabela 21 - Cargas lineares distribuídas na viga de piso crítica do pavimento tipo ..	86
Tabela 22- Verificações viga crítica de piso do pavimento tipo	89
Tabela 23 - Cargas lineares distribuídas na viga crítica de piso do reservatório.....	90
Tabela 24 - Verificações viga crítica de piso do reservatório	92
Tabela 25 - Verificações do pilar P16.....	99
Tabela 26 - Resumo de cálculo pilarete crítico.....	105
Tabela 27 - Verificações mão francesa à compressão.....	112
Tabela 28 - Verificações mão francesa à tração	113

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Objetivos	16
1.2. Justificativas	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1. Sistema estrutural em madeira.....	17
2.2. Madeira laminada colada	18
2.3. Elementos construtivos	20
3. METODOLOGIA	21
3.1. Objeto de estudo	22
3.1.1. Sistema estrutural do edifício	24
3.2. Materiais.....	33
3.3. Cargas.....	34
3.3.1. Cargas permanentes.....	34
3.3.1.1. Peso próprio das paredes	34
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).....	36
3.3.1.2. Peso próprio do piso.....	36
3.3.1.3. Peso próprio da caixa d'água	39
3.3.2. Cargas variáveis.....	40
3.3.2.1. Sobrecarga de utilização do apartamento	41
3.3.2.2. Cargas do vento	42
3.3.3. Combinações de cargas.....	51
4. PROCEDIMENTO DE DIMENSIONAMENTO DAS PEÇAS ESTRUTURAIS	53
4.1. Procedimento de cálculo para as propriedades físicas da madeira	54
4.2. Verificações do Estados limites últimos.....	57

4.2.1. Solicitações normais.....	57
4.2.2. Solicitação ao cisalhamento.....	59
4.2.3. Estabilidade.....	60
4.3. Estado de limite de serviço.....	64
5. PROPRIEDADES DE CÁLCULO DA MADEIRA E MODELAGEM COMPUTACIONAL DO PROJETO.....	64
5.1. Valores das propriedades de cálculo da madeira.....	65
5.2. Modelagem computacional.....	66
5.3. Planilha de dimensionamento.....	69
6. RESULTADOS PARA ESTADO DE LIMITE ÚLTIMO.....	71
6.1. Vigas principais.....	71
6.1.1. Viga crítica à momento e esforço cortante.....	71
6.1.1.1. Verificações de estabilidade – viga crítica à momento e a cortante.....	72
6.1.1.2. Verificações de solicitações normais - viga crítica à momento e a cortante.....	74
6.1.1.3. Verificação de cisalhamento - viga crítica à momento e a cortante.....	75
6.1.1.4. Resumo de cálculo - viga crítica à momento e a cortante.....	75
6.1.2. Viga crítica a esforço normal.....	77
6.1.2.1. Verificações de estabilidade – viga crítica à esforço normal.....	78
6.1.2.2. Verificações de solicitações normais - viga crítica à esforço normal.....	80
6.1.2.3. Verificação de cisalhamento - viga crítica à esforço normal.....	82
6.1.2.4. Resumo de cálculo - viga crítica à esforço normal.....	82
6.2. Vigas secundárias.....	85
6.2.1. Viga secundária crítica do pavimento tipo.....	86
6.2.1.1. Verificações de estabilidade – viga crítica secundária do pavimento tipo.....	87
6.2.1.2. Verificações de solicitações normais - viga crítica secundária do pavimento tipo.....	88
6.2.1.3. Verificação de cisalhamento - viga crítica secundária do pavimento tipo.....	88

6.2.1.4. Resumo de cálculo - viga crítica secundária do pavimento tipo	88
6.2.2. Viga secundária crítica do reservatório	90
6.2.2.1. Verificações de estabilidade – viga crítica secundária do reservatório	90
6.2.2.2. Verificações de solicitações normais - viga crítica secundária do reservatório	91
6.2.2.3. Verificação de cisalhamento - viga crítica secundária do reservatório	92
6.2.2.4. Resumo de cálculo - viga crítica secundária do reservatório	92
6.3. Pilares	93
6.3.1. Verificações de estabilidade – pilar crítico.....	95
6.3.2. Verificações de solicitações normais – pilar crítico	96
6.3.3. Verificação de cisalhamento – pilar crítico	98
6.3.4. Resumo de cálculo – pilar crítico.....	99
6.4. Pilaretes da escada.....	100
6.4.1. Verificações de estabilidade – pilarete crítico.....	101
6.4.2. Verificações de solicitações normais – pilarete crítico	102
6.4.3. Verificação de cisalhamento – pilarete crítico	104
6.4.4. Resumo de cálculo – pilarete crítico.....	104
6.5. Mão francesa.....	106
6.5.1. Verificações de estabilidade – mão francesa crítica.....	107
6.5.2. Verificações de solicitações normais – mão francesa crítica.....	109
6.5.3. Verificação de cisalhamento – mão francesa crítica	111
6.5.4. Resumo de cálculo – mão francesa crítica.....	111
7. RESULTADOS PARA ESTADO DE LIMITE DE SERVIÇO	114
8. DISCUSSÕES SOBRE OS RESULTADOS	116
9. CONCLUSÕES.....	116
REFERÊNCIAS.....	119

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um dos materiais mais antigos empregados na construção civil pela humanidade. Até o século XIX, as principais estruturas construtivas eram predominantemente realizadas utilizando-se madeira ou pedra, frequentemente em combinação. Contudo, foi somente na primeira metade do século XX que começaram a surgir estudos aprofundados sobre teorias técnicas construtivas. Após a Segunda Guerra Mundial, observou-se um avanço considerável nos métodos teóricos, culminando atualmente em mecanismos precisos para a elaboração de projetos estruturais (Pfeil, 2003).

Do ponto de vista ecológico, e contrariando a crença popular, a madeira representa uma alternativa sustentável significativa. Isso se deve ao fato de sua produção demandar um consumo energético inferior ao dos materiais convencionais. De acordo com dados da Organização das Nações Unidas, o setor da construção civil foi responsável por 34% da demanda energética global e por 37% das emissões de dióxido de carbono no ano de 2021. Segundo o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), uma tonelada de madeira seca é capaz de absorver mais de 1,7 toneladas de dióxido de carbono, além de incorporar 0,48 kg de carbono e liberar 1,22 toneladas de oxigênio para a atmosfera durante seu crescimento.

A viabilidade da utilização sustentável da madeira é assegurada pelo manejo florestal ambientalmente correto, que promove a produção responsável nas florestas por meio de técnicas que minimizam os danos ao meio ambiente e possibilitam a regeneração dos recursos explorados. Certificações como a do FSC® (Forest Stewardship Council®) garantem que a exploração da madeira ocorra de maneira adequada.

No cenário brasileiro, a utilização da madeira na construção civil predomina principalmente em residências localizadas em áreas rurais e em habitações destinadas a populações de baixa renda, conforme ilustrado na Figura 1. Este material também é comum em estruturas de cobertura. Adicionalmente, a madeira é amplamente empregada em canteiros de obras para a construção de estruturas temporárias, tais como escoras, formas e andaimes, como demonstrado na Figura 2.

Figura 1 - Habitações feitas de taipa e madeira



Fonte: ALECE (2021)

Figura 2 - Uso da madeira em canteiro de obras



Fonte: Sua obra (2024)

A maioria dos edifícios verticais em madeira é pré-fabricada, empregando sistemas construtivos como Light Wood Frame, Post + Beam, Mass Timber e sistemas híbridos (combinações de madeira, aço e/ou concreto). Entre esses sistemas, o Mass Timber se destaca por utilizar técnicas como Madeira Laminada Colada (MLC) e

Madeira Laminada Cruzada (CLT - Cross Laminated Timber), que oferecem facilidade de manuseio e alta resistência estrutural.

Exemplos notáveis de edificações que utilizam essas técnicas incluem o prédio Ascent nos Estados Unidos, que apresenta uma base de concreto com o restante da estrutura em MLC e CLT, alcançando uma altura de 86 metros, conforme ilustrado na Figura 3. Outro exemplo é o Mjøstårnet na Noruega, que possui 84,5 metros de altura e é construído inteiramente em MLC, conforme demonstrado na Figura 4. Estes exemplos evidenciam o potencial da madeira como material estrutural viável e sustentável para construções em grande escala.

Figura 3 - Ascet, EUA



Fonte: Casa vogue (2023)

Figura 4 - Mjøstårnet, Noruega



Fonte: Casa vogue (2023)

Nesse contexto, o presente estudo, fundamentado na recente norma ABNT NBR 7190-1:2022, buscou realizar o dimensionamento de peças estruturais de madeira para um edifício residencial. A pesquisa se concentrou na aplicação e adaptação dos princípios e critérios estabelecidos pela nova regulamentação, que orienta o projeto de estruturas de madeira, garantindo que todas as peças estruturais atendam aos requisitos de resistência, durabilidade e segurança. Este trabalho empregou métodos de análise estrutural avançados e considerou variáveis críticas, como as características físicas da madeira, as cargas atuantes e as condições

ambientais específicas do local de construção, para otimizar o desempenho e a eficiência das estruturas projetadas.

1.1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é a elaboração do cálculo e verificação de elementos estruturais de um edifício residencial de pequeno porte, construído utilizando madeira laminada colada (MLC) como material principal em um sistema convencional composto por pilares, vigas e lajes de madeira. Este estudo visa garantir que todos os componentes estruturais atendam às normas técnicas vigentes e às expectativas de desempenho e segurança.

Como objetivo secundário, o trabalho propõe uma breve introdução ao uso da madeira como elemento estrutural. Serão apresentados alguns elementos construtivos, enfatizando suas características e peculiaridades.

1.2. Justificativas

No contexto contemporâneo, a análise de sistemas construtivos transcende o mero aspecto econômico, abrangendo também fatores estéticos e ambientais, que são temas de constante debate global. Dentro desse panorama, a madeira emerge como uma alternativa valiosa, oferecendo diversidade estética e menor impacto ambiental. No entanto, apesar dessas vantagens, o uso da madeira em construções de médio e grande porte no Brasil ainda é limitado, principalmente devido à falta de profissionais especializados e à percepção equivocada sobre a resistência desse material estrutural.

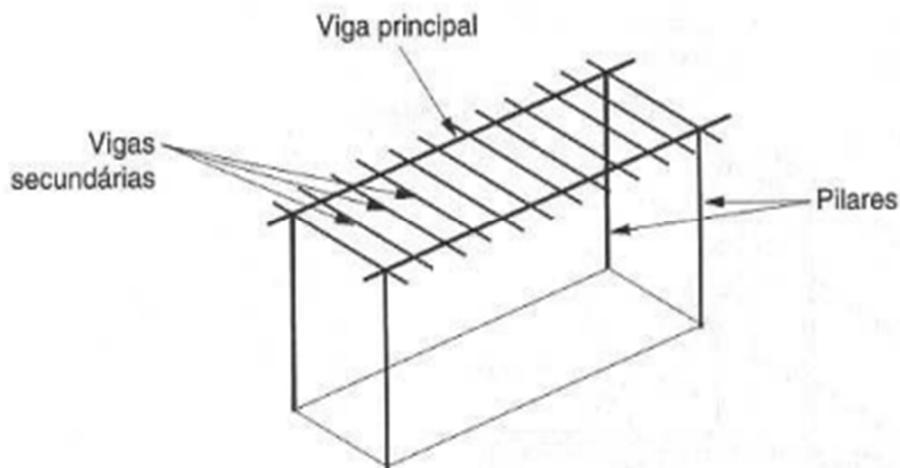
Além disso, este trabalho visa contribuir para o desenvolvimento profissional do autor na elaboração de projetos estruturais, utilizando-se das teorias abordadas no curso e das normas técnicas relevantes ao tema. Assim, o autor tem a oportunidade de praticar e consolidar os conhecimentos adquiridos ao longo de sua formação acadêmica em engenharia.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1.Sistema estrutural em madeira

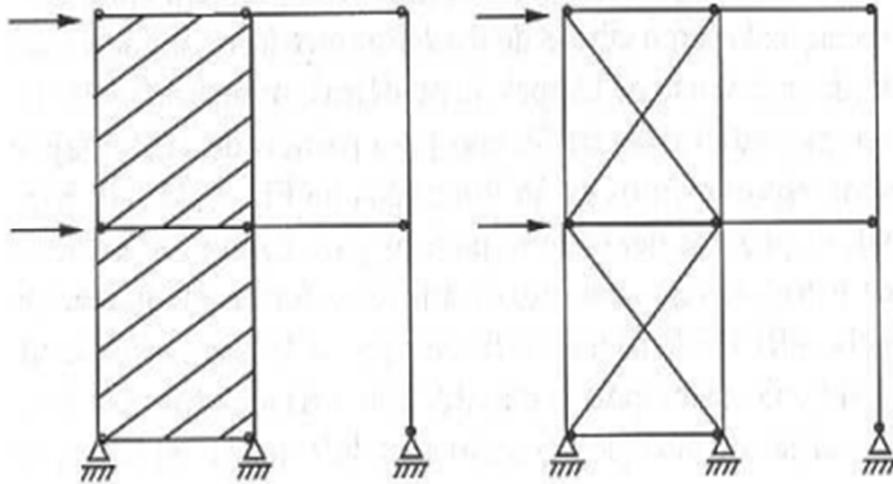
As lajes de madeira estão propensas a vibrações excessivas, e este problema pode ser mitigado através do uso de vigas de piso, que são vigas secundárias apoiadas em vigas principais, conforme ilustra a Figura 5. As ligações entre pilares e vigas em estruturas de madeira geralmente são deformáveis, atuando de forma similar a rótulas. Assim, para garantir a estabilidade lateral da construção, é essencial a inclusão de contraventamentos verticais. Esse contraventamento pode ser implementado usando paredes diafragma ou estruturas treliçadas em formatos X ou K, como mostrado na Figura 6 (Pfeil, 2003).

Figura 5 – Detalhe de viga secundárias.



Fonte: PFEIL (2003)

Figura 6 - Estruturas de contraventamento



Fonte: PFEIL (2003)

2.2. Madeira laminada colada

A madeira laminada colada é formada pela união de lamelas de madeira prensada, coladas paralelamente às fibras. Essa técnica permite que as peças tenham dimensões únicas e capacidade de vencer grandes vãos. Devido ao rigoroso processo de fabricação, essas madeiras são mais resistentes a agentes químicos, biológicos e físicos, além de apresentarem um melhor acabamento e estética, o que contribui para a decoração dos ambientes. (Archdaily, 2019)

A utilização da madeira laminada colada na construção facilita o manuseio, pois as peças já chegam prontas ao local de instalação, agilizando o processo de construção. Além disso, a leveza dessas peças simplifica a manutenção, o transporte e a instalação. (Archdaily, 2019)

As peças estruturais em MLC podem ser curvadas (Figura 7), adicionando beleza e permitindo detalhes arquitetônicos que são difíceis de alcançar com outros materiais convencionais. Na Figura 8 é mostrada uma estrutura para cobertura em madeira laminada colada (MLC). (Archdaily, 2019)

No entanto, um dos desafios do uso da madeira laminada colada é o seu custo elevado, podendo chegar a mais de 20 mil reais por metro cúbico. (Laporta, 2024)

Figura 7 - Peça em MLC curva



Fonte: Archdaily (2019)

Figura 8 - Estrutura em MLC



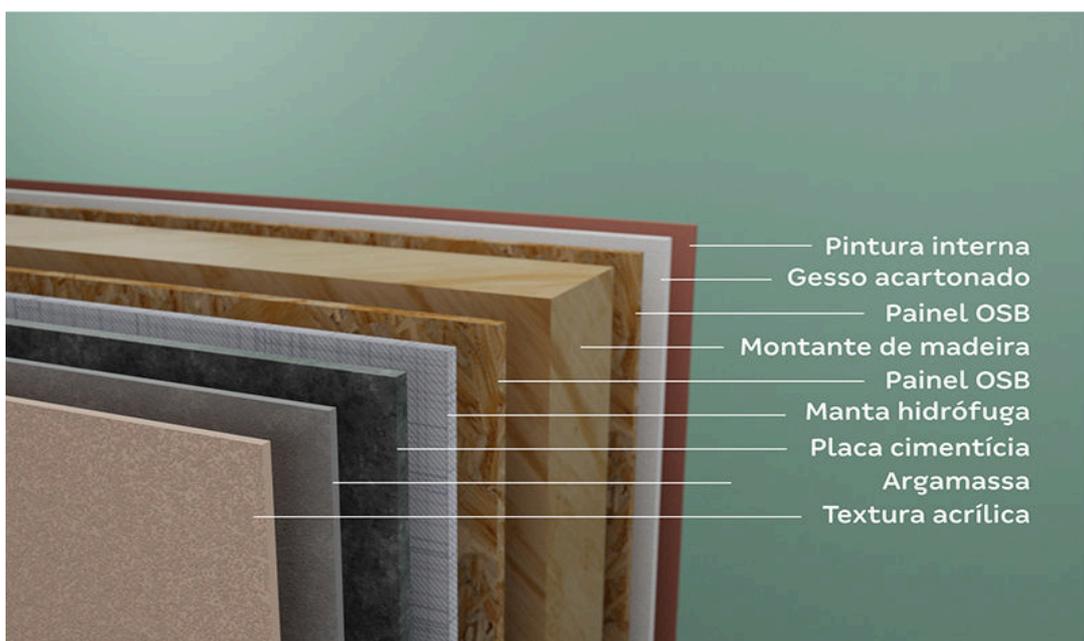
Fonte: Cornetta arquitetura (2024)

2.3. Elementos construtivos

Os fechamentos em madeira, comumente utilizados em construções, são frequentemente realizados utilizando placas OSB, que são versáteis o suficiente para serem aplicadas tanto em pisos quanto em paredes. Essas placas são constituídas por madeira e dois painéis de OSB, proporcionando uma estrutura robusta e resistente. A montagem das camadas de outros materiais sobre as placas é adaptada conforme o tipo específico de ambiente em que as placas são instaladas, a Figura 9 ilustra essas camadas. (Blog Alea, 2024)

As placas OSB desempenham diversas funções essenciais: a manta hidrófuga aplicada às placas protege as paredes contra o desenvolvimento de mofo e a penetração de água, além de facilitar a saída de vapor dos ambientes internos, evitando problemas de condensação. Por sua vez, a placa cimentícia adicionada à estrutura confere resistência contra variações térmicas, tornando a construção mais adaptável a diferentes climas. O gesso acartonado, por outro lado, não apenas fortalece a estrutura contra forças de compressão, mas também proporciona um acabamento superior, o que é vantajoso para interiores onde a estética é uma preocupação. (Blog Alea, 2024)

Figura 9 - Camadas de vedação com placa OSB



Fonte: Blog Alea (2024)

No que diz respeito às lajes, estas são construídas com placas OSB e revestidas adicionalmente com outras placas para uma proteção e durabilidade maiores. Especificamente em áreas úmidas, as lajes são equipadas com camadas de placa cimentícia em ambas as faces, aumentando a resistência à umidade e ao desgaste, de acordo com LP building products. Para melhorar ainda mais as propriedades isolantes das lajes, uma camada de lã de vidro é incorporada para isolamento térmico e acústico, assegurando conforto ambiental interno. Finalmente, o acabamento do piso é realizado com um revestimento genérico, escolhido conforme a necessidade estética e funcional do espaço.

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho baseia-se no estudo do objeto de trabalho, dos materiais utilizados e das cargas envolvidas. Inicialmente, são apresentados o projeto arquitetônico e alguns detalhes construtivos e estruturais do edifício, incluindo localização e dimensões do edifício e da estrutura. Em seguida, realiza-se uma análise dos materiais empregados, o que facilitará a determinação das cargas atuantes sobre o objeto de estudo.

Esta etapa inicial serve como fundamento para o desenvolvimento subsequente do trabalho, que inclui os procedimentos de dimensionamento das peças estruturais. Após isso, procede-se à modelagem computacional, que integra os dados obtidos e ajuda a consolidar os resultados. Finalmente, as conclusões são formuladas com base nas análises e nos resultados alcançados durante o estudo.

As normas técnicas adotadas para este projeto incluem uma série de diretrizes estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), essenciais para garantir a conformidade e a segurança estrutural do edifício. A seguir estão detalhadas as normas utilizadas:

- ABNT NBR 7190-1:2022 - Esta norma rege o procedimento de cálculo e verificação das peças estruturais em madeira, fornecendo os critérios necessários para o dimensionamento adequado destas estruturas.

- ABNT NBR 5626:1998 - Instalação predial de água fria, utilizada para o cálculo da reservação técnica do edifício, garantindo que os sistemas de água fria sejam projetados de maneira eficiente e segura.
- ABNT NBR 6120:2019 - Ações para cálculos de estruturas de edificações, que especifica os valores de sobrecarga dos ambientes do edifício, essencial para o dimensionamento estrutural que leva em consideração as cargas que as diferentes áreas do edifício devem suportar.
- ABNT NBR 6123:1988 - Forças devido ao vento em edificações, que define os parâmetros para o cálculo das forças que o vento exerce sobre as edificações, crucial para a integridade e segurança estrutural em áreas sujeitas a ventos fortes.
- ABNT NBR 8681:2004 - Ações e segurança nas estruturas – Procedimento para as combinações de ações, que orienta como combinar de forma segura e eficaz as diferentes ações que afetam uma estrutura durante sua vida útil.

Estas normas são fundamentais para o desenvolvimento de um projeto que não só atende aos requisitos técnicos e de segurança, mas também assegura a durabilidade e a funcionalidade do edifício ao longo do tempo.

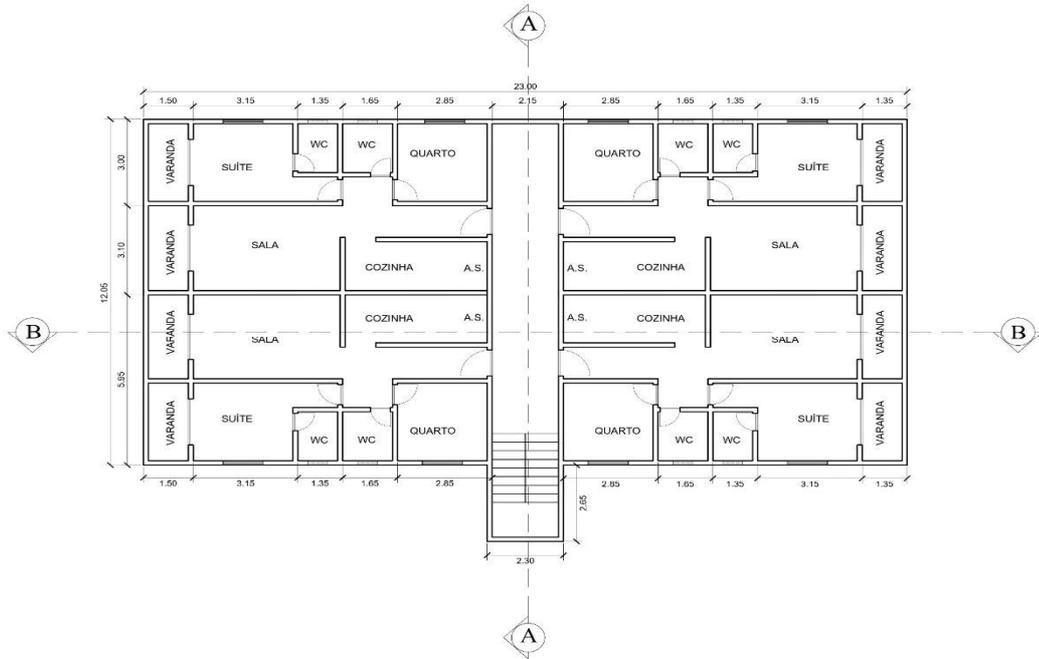
3.1.Objeto de estudo

O projeto arquitetônico desenvolvido abrange a construção de um edifício residencial de quatro pavimentos. Cada pavimento apresenta uma planta baixa tipo, consistindo em quatro apartamentos de 64,05 m² com altura de 3 metros cada, resultando em uma área total de 283,25 m² por pavimento. A altura total do edifício é de 16 metros, considerando, além dos quatro pavimentos, um nível adicional dedicado exclusivamente ao reservatório.

Cada apartamento é composto por dois quartos, sendo um deles suíte, dois banheiros (um social e o da suíte), duas varandas, uma cozinha e uma área de serviço. A planta do edifício está detalhada na Figura 10. Além disso, serão apresentados dois cortes transversais da edificação, ilustrados nas Figuras 11 e 12, proporcionando uma visão mais detalhada da disposição interna e da estrutura do prédio.

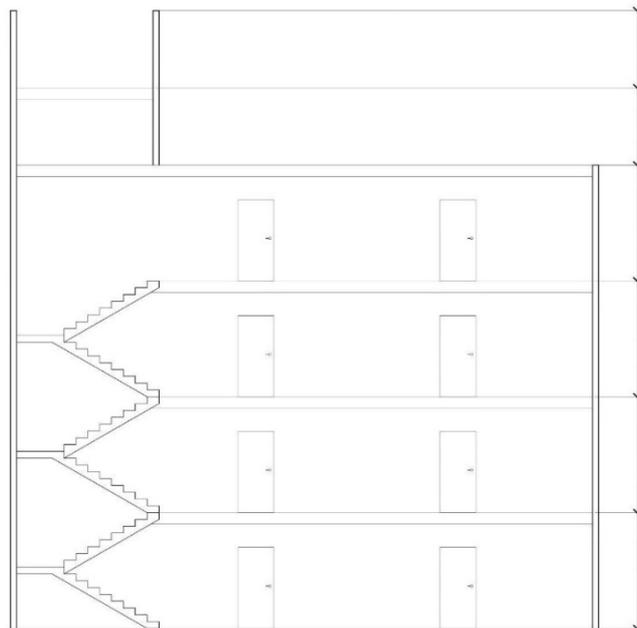
O projeto está localizado no município de João Pessoa, capital da Paraíba, situado em um bairro predominantemente residencial.

Figura 10 - Planta baixa do edifício



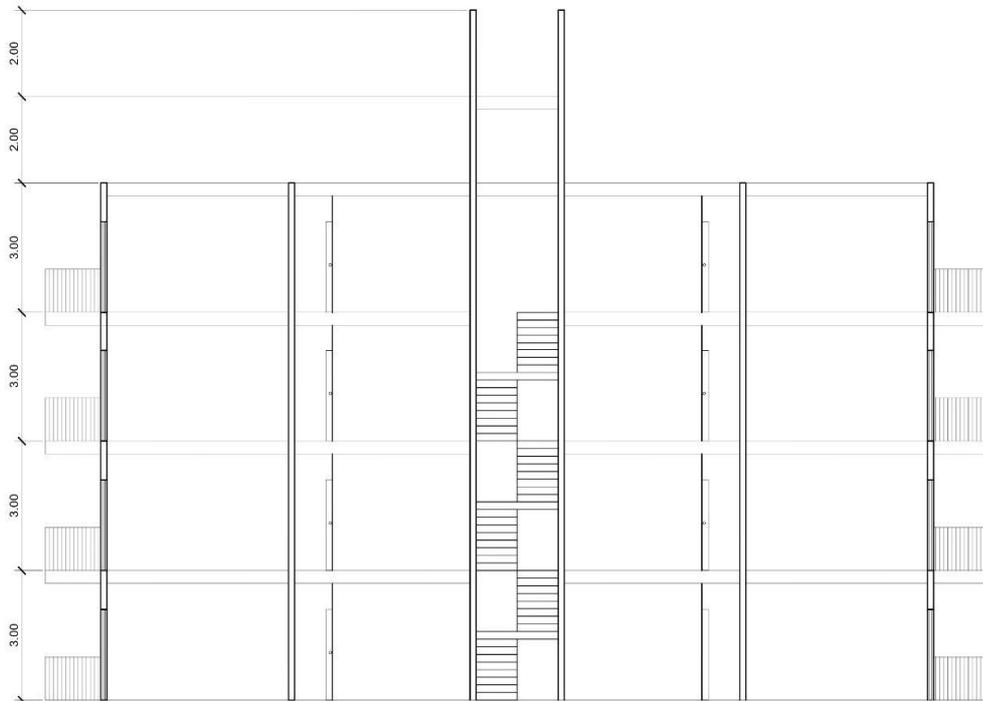
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 11 - Corte A-A



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 12 - Corte B-B



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

3.1.1. Sistema estrutural do edifício

O projeto estrutural deste edifício residencial envolve a utilização de pilares e vigas em madeira laminada colada, garantindo robustez e estabilidade. As lajes serão construídas usando placas de OSB, com camadas adicionais de placas cimentícias para resistência e lã de vidro para isolamento térmico e acústico. O sistema de contraventamento será implementado usando mãos-francesas, que são ilustradas na Figura 13, mostrando sua aplicação em coberturas.

As mãos-francesas usadas neste projeto têm 1,41 metro de comprimento e são posicionadas a 1 metro de distância, tanto vertical quanto horizontalmente, da emenda do pilar, oferecendo suporte adicional e reduzindo a flexibilidade da estrutura. A Figura 14 exibe as especificações de uma placa de OSB da marca LP Building Products, destacando que as placas usadas para o piso, com espessura de 18,3 mm e um espaçamento entre vigas de 40 centímetros, podem suportar uma sobrecarga de até 650 kgf/m².

A escada do edifício será construída também com placas de OSB para os pisos, apoiadas em vigas inclinadas e pilaretes de MLC, proporcionando uma conexão segura e esteticamente agradável entre os andares.

A planta estrutural, detalhada na Figura 15, mostra a disposição dos pilares e vigas principais, além da direção das cargas nas lajes e a localização dos eixos estruturais do edifício. A Figura 16 destaca os elementos estruturais no nível dos reservatórios, enquanto a Figura 17 oferece uma vista completa da estrutura do edifício. As Figuras 18 a 25 demonstram os pórticos de cada eixo do edifício, fornecendo uma visão detalhada de cada componente estrutural e sua função dentro do conjunto da obra.

Figura 13 - Mão-francesa em estrutura de telhado



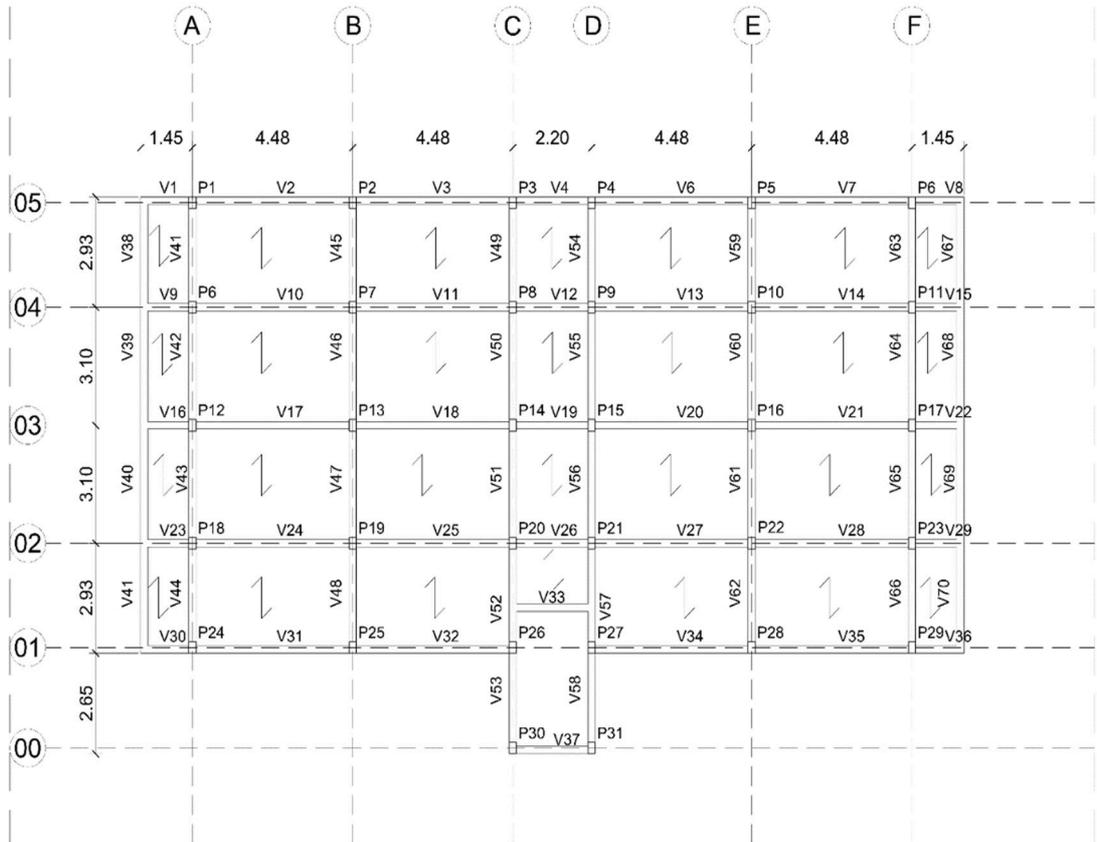
Fonte: Youtube (2019)

Figura 14- Cargas admissíveis nas lajes

TABELA DE CARGAS LP OSB HOME EM PISOS (L/300)		
ESPESSURA (mm)	ESPAÇAMENTO ENTRE APOIOS (mm)	CARGA MÁXIMA ADMISSÍVEL (kgf/m²)
15,1	400	400
18,3	400	650
18,3	600	215

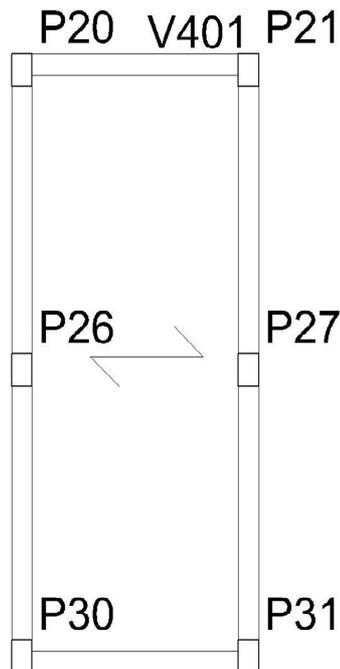
Fonte: LP building products (2012)

Figura 15 - Identificação de eixos e elementos estruturais



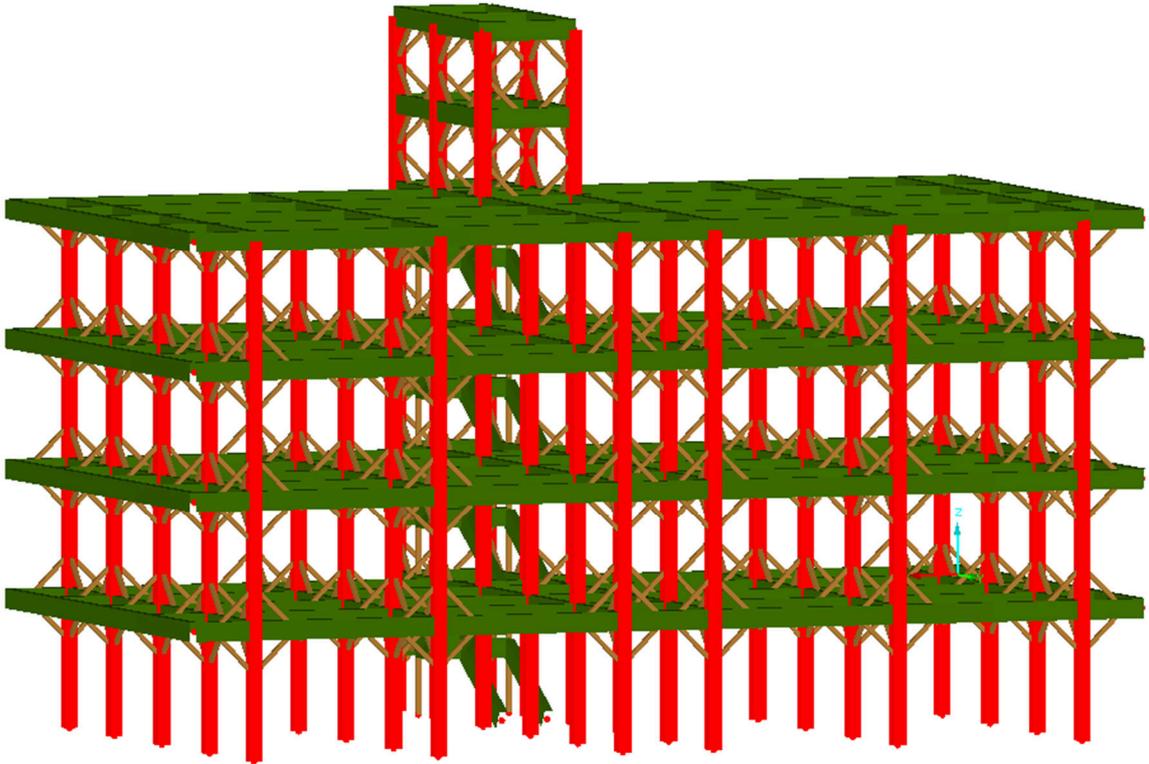
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 16 - Identificação dos elementos no nível do reservatório



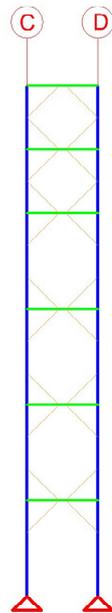
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 17 - Estrutura do edifício em 3d



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

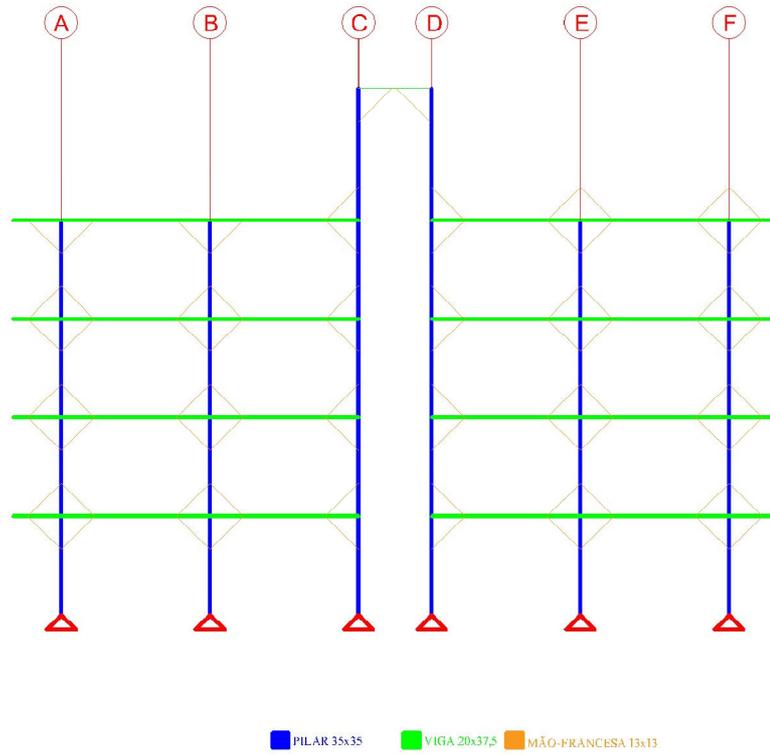
Figura 18 - Pórtico do eixo 0



■ PILAR 35x35 ■ VIGA 20x37,5 ■ MÃO-FRANCA 13x13

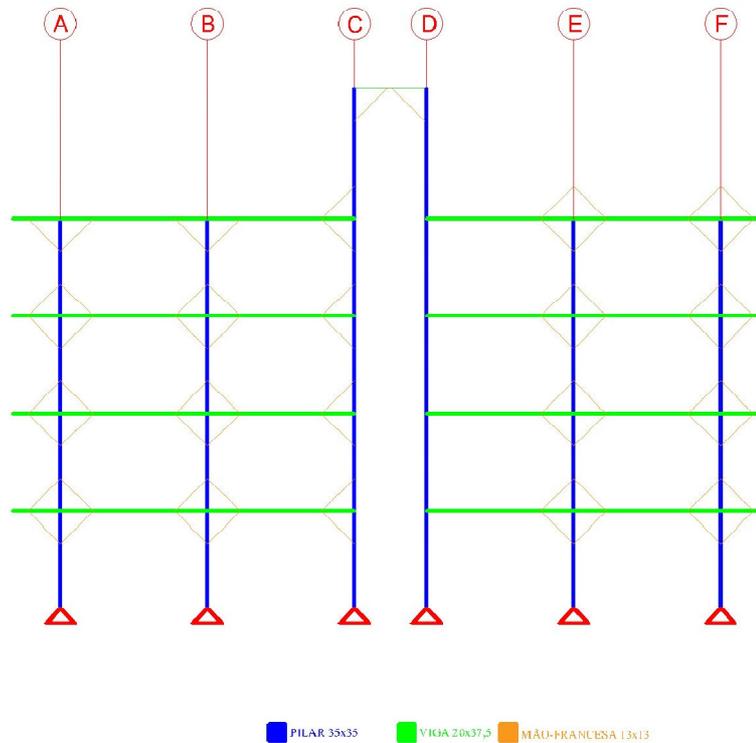
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 19 - Pórtico do eixo 1



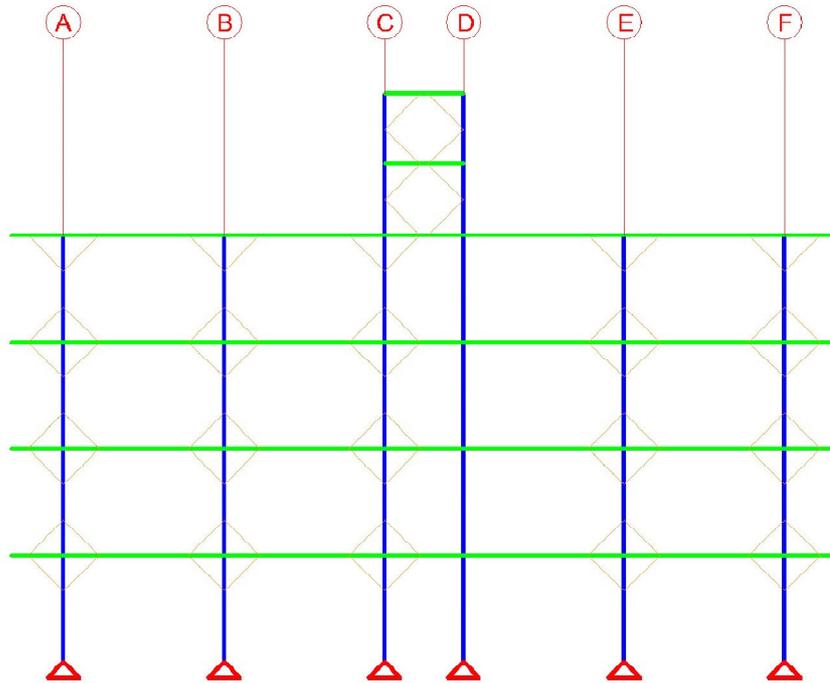
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 20 - Pórtico do eixo 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

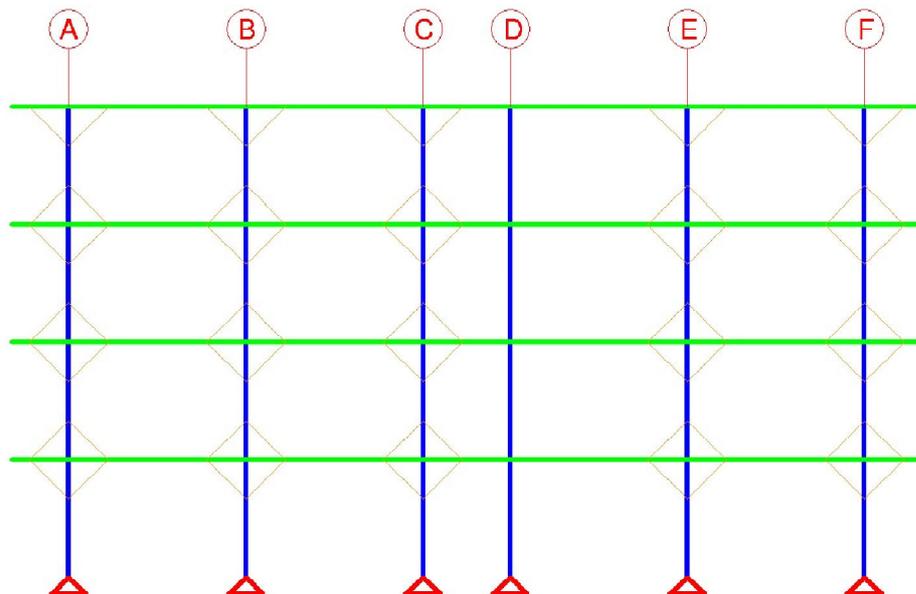
Figura 21- Pórtico do eixo 3



■ PILAR 35x35 ■ VIGA 20x37,5 ■ MÃO-FRANCESSA 13x13

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

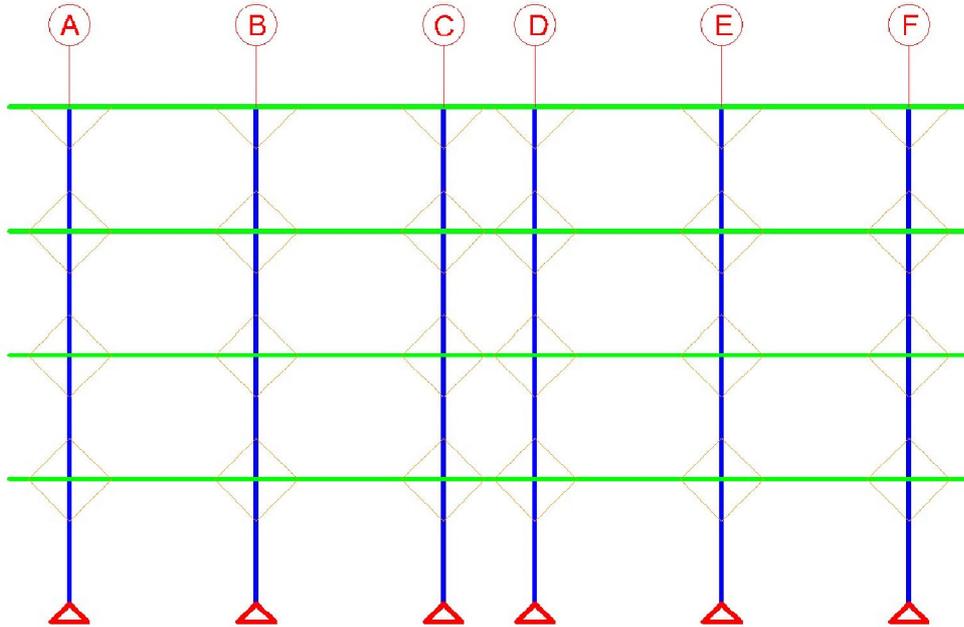
Figura 22 - Pórtico do eixo 4



■ PILAR 35x35 ■ VIGA 20x37,5 ■ MÃO-FRANCESSA 13x13

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

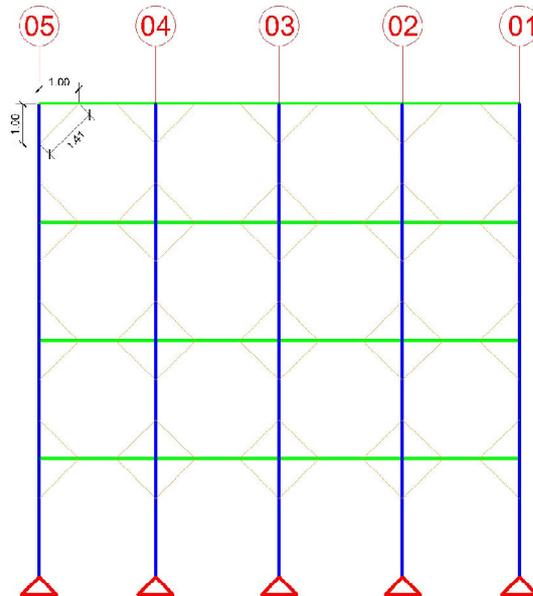
Figura 23 - Pórtico do eixo 5



■ PILAR 35x35
 ■ VIGA 20x37,5
 ■ MÃO-FRANCESA 13x13

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 24 - Pórticos do eixo A, B, E e F



■ PILAR 35x35
 ■ VIGA 20x37,5
 ■ MÃO-FRANCESA 13x13

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA (MPa)		
TRAÇÃO PARALELA	$f_{t,o,k}$	18
TRAÇÃO PERPENDICULAR	$f_{t,90,k}$	0,6
COMPRESSÃO PARALELA	$f_{c,o,k}$	25
COMPRESSÃO PERPENDICULAR	$f_{c,90,k}$	8,1
CISALHAMENTO	$f_{v,k}$	4
PROPRIEDADES DE RIGIDEZ GPa		
MÓDULO DE ELASTICIDADE A 0° MÉDIO	$E_{o,m}$	11
MÓDULO DE ELASTICIDADE À 0° CARACTERÍSTICO	$E_{0,05}$	9,2
MÓDULO DE ELASTICIDADE A 90° MÉDIO	$E_{90,m}$	0,7
MÓDULO DE TRANSVERSAL MÉDIO	G_m	0,7
DENSIDADE kg/m³		
DENSIDADE CARACTERÍSTICA	ρ_k	530
DENSIDADE MÉDIA	ρ_m	640

Fonte: Adaptado pelo autor (2024)

Embora existam estudos e procedimentos para o pré-dimensionamento de estruturas de madeira, as mudanças significativas implementadas na ABNT NBR 7190-1 (2022) em relação à versão anterior, ABNT NBR 7190 (1997), aliadas ao limitado volume de literatura sobre o tema, levaram à decisão de realizar o pré-dimensionamento conforme a escolha do autor. A Tabela 2 apresenta o pré-dimensionamento e as propriedades geométricas das peças estruturais essenciais para o cálculo e as verificações de segurança.

Tabela 2 - Propriedades geométricas das peças estruturais

-	VIGA	PILAR	VIGAS DE PISO	PILARETES ESCADA	MÃO-FRANCESA
SEÇÃO	Retangular	Retangular	Retangular	Retangular	Retangular
BASE (cm)	20,00	35,00	11,50	12,50	13
ALTURA (cm)	37,50	35,00	22,50	12,50	13
A (cm²)	750,00	1.225,00	258,75	156,25	169,00
I_x (cm⁴)	87.890,63	125.052,08	10.916,02	2.034,51	2.380,08
I_y (cm⁴)	25.000,00	125.052,08	2.851,64	2.034,51	2.380,08
i_x (cm)	10,83	10,10	6,50	3,61	3,75

-	VIGA	PILAR	VIGAS DE PISO	PILARETES ESCADA	MÃO-FRANCESA
iy (cm)	5,77	10,10	3,32	3,61	3,75
dx (cm)	18,75	17,50	11,25	6,25	6,50
dy (cm)	10,00	17,50	5,75	6,25	6,50
wx (cm³)	4.687,50	7.145,83	970,31	325,52	366,17
wy (cm³)	2.500,00	7.145,83	495,94	325,52	366,17

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

3.2. Materiais

No presente trabalho, serão utilizadas placas de OSB para o fechamento de pisos e paredes, além da madeira laminada colada (MLC) para o sistema estrutural principal.

As paredes, compostas por placas de OSB e camadas associadas, têm uma massa de 150 kg/m², conforme detalhado por Romário Ferreira (2013). Estas paredes possuem 3 metros de comprimento. As lajes, por sua vez, são construídas com placas de OSB de 18,3 mm de espessura, espaçamento entre apoios de 400 mm, e são capazes de suportar uma sobrecarga máxima de 650 kgf/m², como discutido no item 3.1.1.

Associadas às placas de piso, encontram-se uma dupla camada de placas cimentícias de mesma dimensão e uma camada de lã de vidro. As placas de piso OSB, segundo especificações da LP Building Products (2012), medem 1,2 x 2,4 m e pesam 33,7 kg cada. As placas cimentícias, de acordo com informações da Leroy Merlin (2024), pesam 26 kg cada, totalizando 52 kg para as duas placas. A lã de vidro, também segundo a Leroy Merlin (2024), pesa 7,5 kg para um rolo de 1,2 x 12,5 metros. Para a madeira laminada colada, escolheu-se a madeira de reflorestamento de eucalipto, especificamente a espécie *Eucalyptus cloeziana*, devido ao seu rápido ciclo de crescimento e adequada resistência para uso estrutural. Esta espécie é tratada em João Pessoa pela UMT Eucalipto Tratado e foi selecionada para o projeto por sua viabilidade de tratamento em MLC.

3.3. Cargas

As cargas atuantes em um edifício podem ser classificadas como permanentes e variáveis. As cargas permanentes originam-se do peso próprio da estrutura e de elementos fixos presentes na edificação, como os revestimentos. Já as cargas variáveis decorrem do uso do ambiente e de forças externas que variam ao longo do tempo, como a carga de vento, por exemplo.

Para analisar as cargas atuantes no edifício, foram utilizadas as referências normativas da ABNT NBR 6120 (2019) - Ações para o cálculo de estruturas de edificações, e da ABNT NBR 6123 (1988) - Forças devido ao vento em edificações. Estas normas fornecem os parâmetros e diretrizes necessários para garantir que todos os aspectos das cargas sejam devidamente considerados no projeto estrutural.

3.3.1. Cargas permanentes

As cargas permanentes referem-se aos pesos dos objetos que permanecem fixos ao longo da maior parte da vida útil de um edifício. Neste trabalho, as cargas de natureza permanente incluem o peso das paredes, dos pisos e da caixa d'água.

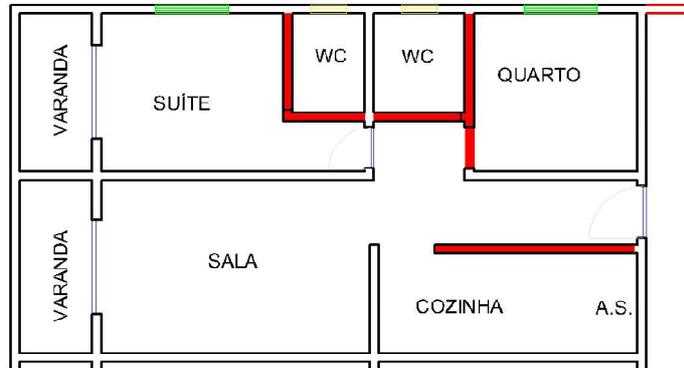
3.3.1.1. Peso próprio das paredes

No projeto, a carga das paredes é distribuída uniformemente e transferida diretamente aos elementos estruturais que as suportam. Enquanto a maioria das paredes se apoia diretamente nas vigas, há três paredes, conforme ilustrado na Figura 26, que se apoiam nas lajes. A carga dessas paredes é distribuída uniformemente nas lajes e, em seguida, nas vigas que suportam essas lajes, seguindo o sentido das cargas nas lajes.

O peso das paredes está especificado na Tabela 03. Este foi calculado multiplicando a densidade do material, previamente discutida, pela altura da parede. O resultado, inicialmente em kg/m, foi posteriormente convertido para kN/m para adEquação aos padrões de engenharia utilizados nos cálculos estruturais.

Figura 26 - Paredes aplicadas em laje no pavimento

■ PAREDES APOIADAS EM LAJE



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 3 - Carga das paredes

PAREDES	
Altura	3
Densidade (Kg/m ²)	150
Peso (Kg/m)	450
Peso (kN/m)	4,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Tabela 4 apresenta os pesos das paredes que são apoiadas sobre as lajes, e em uma coluna subsequente, mostra o peso linear dessas paredes distribuído sobre as vigas que suportam as respectivas lajes. A organização dos pesos e das vigas correspondentes é a seguinte:

- Laje L1: As vigas que recebem carga desta laje são V2, V7, V10, V14, V24, V28, V31 e V35.
- Laje L2: As vigas que suportam a carga desta laje incluem V3, V6, V11, V13, V25, V27, V32 e V34.
- Laje L3: As vigas que recebem carga desta laje são V11, V13, V18, V20, V25 e V27.

Este detalhamento ajuda a entender como as cargas são transferidas das paredes para as lajes e, conseqüentemente, para as vigas estruturais, assegurando uma distribuição adequada das forças ao longo da estrutura do edifício.

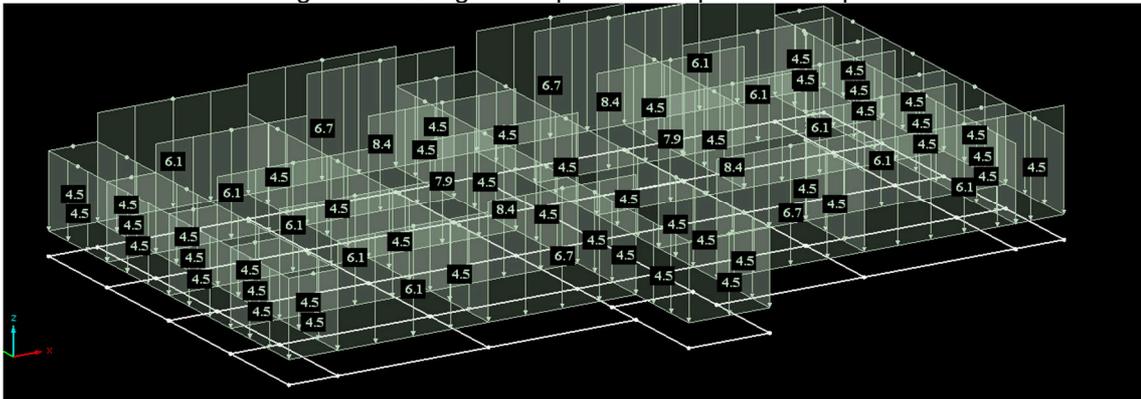
Tabela 4 - Cargas das paredes apoiadas em lajes

LAJE	ÁREA DE PAREDE (m ²)	PESO DA PAREDE (kg)	CARGA DISTRIBUÍDA (kN/m)
L1	9,15	1372,5	1,531808036
L2	12,9	1935	2,159598214
L3	9,9	1485	1,657366071

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

No cálculo das cargas das paredes, os pesos das esquadrias não foram considerados. Como as esquadrias geralmente são mais leves que as paredes, a omissão desses pesos atua a favor da segurança do projeto. Portanto, nas áreas onde há esquadrias, essas foram consideradas como parede fechada para fins de cálculo de carga. Na Figura 27, é possível visualizar a distribuição das cargas das paredes em um pavimento tipo.

Figura 27 - Cargas das paredes no pavimento tipo



3.3.1.2. Fonte: Elaborado pelo autor (2024) Peso próprio do piso

Cada placa de OSB no projeto é suportada por seis vigas de piso, orientadas no sentido da maior dimensão do painel. Segundo a Tabela 1, a madeira utilizada possui uma densidade média de 640 Kg/m³. As especificações das vigas de piso são detalhadas na Tabela 2, e o dimensionamento dessas vigas será discutido posteriormente.

Os pesos do forro e do revestimento foram determinados conforme a NBR 6120 (2019). O peso do forro, considerando um forro de PVC, é de 0,1 kN/m², enquanto o peso para o revestimento residencial, com uma espessura de 5 cm, é de 1 kN/m². Com base nessas informações, foi elaborada a Tabela 5 para sintetizar o peso total do piso por metro quadrado, que será distribuído sobre as lajes. A determinação dos valores das cargas sobre as vigas principais é realizada considerando a área de influência, que segue a distribuição das cargas das lajes.

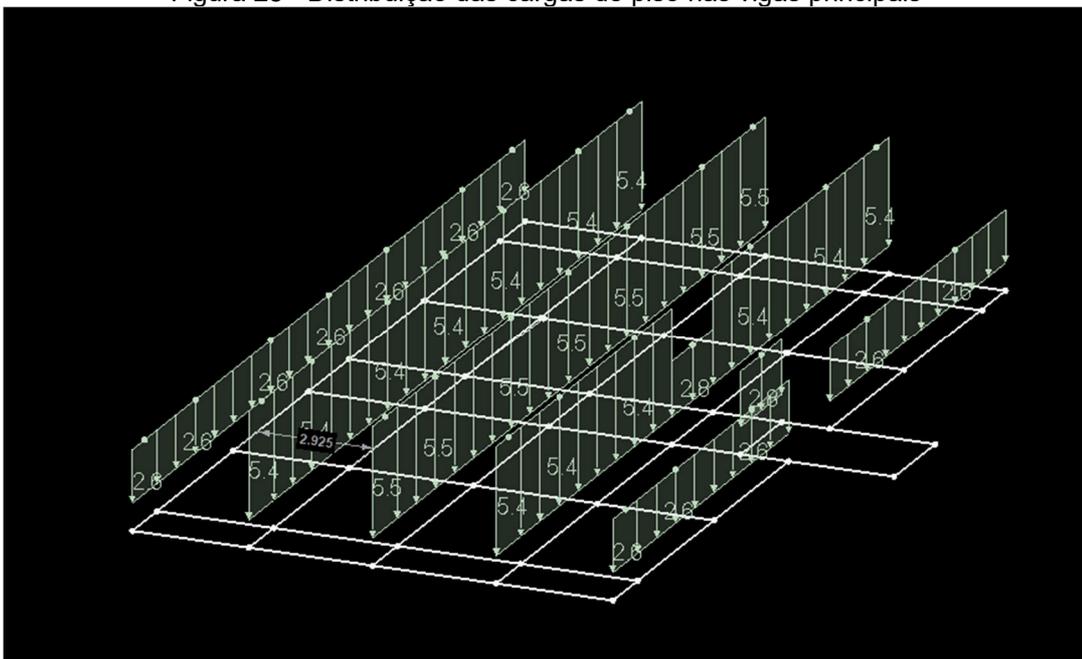
Tabela 5 - Cargas de piso

PISOS		
Material	Peso (kg/m²)	Peso (kN/m²)
Placa OSB	11,70	0,12
Placa cimentícia	18,06	0,18
Lã de vidro	0,52	0,01
Revestimento	100,00	1,00
Forro	10,00	0,10
Viga de piso	34,50	0,35
Total	174,78	1,75

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Figura 28 ilustra como as cargas provenientes do peso próprio do piso são distribuídas no pavimento tipo.

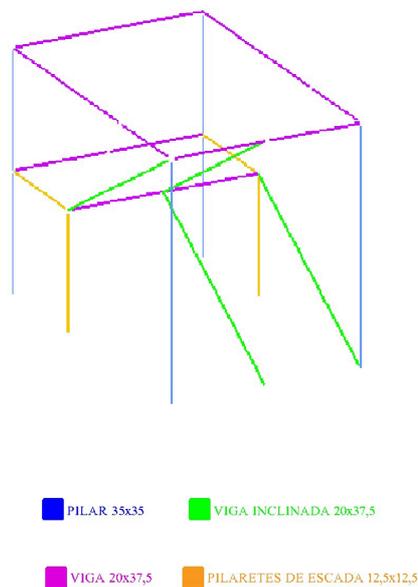
Figura 28 - Distribuição das cargas de piso nas vigas principais



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O procedimento de obtenção de cargas do piso nas vigas de piso é o mesmo que foi discutido neste item. As cargas de piso atuantes na escada foram consideradas as mesmas que atuam no piso do edifício. Na Figura 29, podemos observar a estrutura da escada, onde as vigas inclinadas se apoiam em vigas principais dos pavimentos e vigas intermediárias entre pavimentos. O patamar intermediário da escada está apoiado nas vigas intermediárias entre pavimentos.

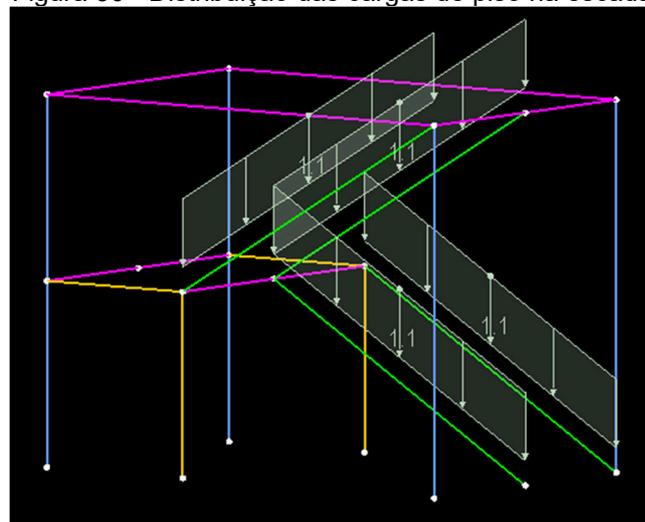
Figura 29 - Estrutura da escada



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Na Figura 30, está ilustrada a distribuição das cargas de piso na escada.

Figura 30 - Distribuição das cargas de piso na escada



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

3.3.1.3. Peso próprio da caixa d'água

As vigas do pavimento do reservatório terão as mesmas dimensões das vigas dos pavimentos tipo. No pavimento mais alto do edifício, a estrutura é principalmente solicitada pelo peso próprio da reserva técnica de água. Seguindo os procedimentos normativos conforme a ABNT NBR 5626 (1998) - Instalação predial de água fria, estimou-se o volume de água necessário para o edifício.

Inicialmente, foi necessário estimar a população máxima residente no edifício, considerando 2 pessoas por quarto. Cada apartamento possui 2 quartos e há 4 apartamentos por pavimento em uma edificação de 4 pavimentos, resultando em um total de 64 residentes (2x2x4x4). O consumo diário de água por pessoa foi estimado em 200 litros, baseado em dados de Macintyre (1990). Assim, o consumo diário de água do edifício é de 12.800 litros (64x200).

Para os reservatórios superiores, adotou-se um volume de reserva igual a 40% do consumo diário do edifício, o que resulta em uma capacidade mínima de reservação de 5.120 litros. Portanto, optou-se por instalar 2 caixas d'água de 3.000 litros cada. O peso de uma caixa d'água vazia, segundo a fabricante Carajás (2024), é de 55 Kg. Considerando que cada caixa d'água armazena 3.000 Kg de água quando cheia (1kg/l de água), o peso total das caixas cheias é uma importante consideração estrutural.

Neste trabalho, assume-se que os reservatórios permanecem cheios durante toda a utilização do edifício. Assim, a carga total atuante na laje do reservatório, devido às caixas d'água, é de 6.110 Kg. Esta carga é distribuída uniformemente sobre a laje. Os valores das cargas nas vigas principais são determinados pela área de influência, seguindo a distribuição das cargas da laje.

A Tabela 6 sintetiza esses valores, e a Figura 31 mostra a distribuição desses valores na estrutura da caixa d'água.

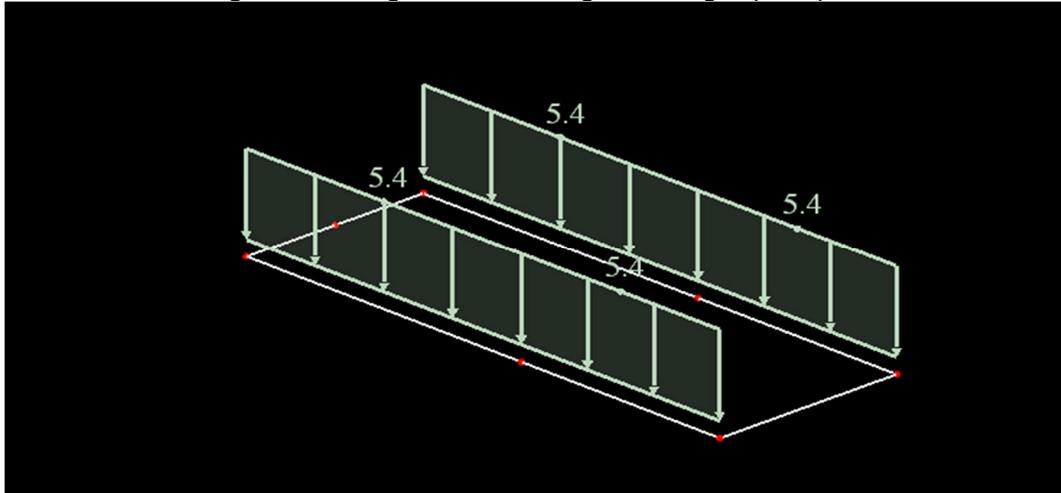
Tabela 6 - Cargas da caixa d'água

PESO CAIXA D'ÁGUA	
Peso (KG)	6.110,00
Peso (kN)	61,10
Área da laje	13,75
Carga na laje (kN/m ²)	4,44

PESO CAIXA D'ÁGUA	
Carga nas vigas principais (KK/m)	5,33

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 31 - Cargas da caixa d'água nas vigas principais



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

3.3.2. Cargas variáveis

A norma ABNT NBR 6120 (2019) - Ações para cálculos de estruturas de edificações, estabelece os valores normativos para as sobrecargas de utilização nos diferentes ambientes de uma edificação. Os valores adotados neste trabalho estão sintetizados na Tabela 7 e foram diretamente retirados dessa norma para garantir que o dimensionamento das estruturas esteja em conformidade com os requisitos regulamentares e assegure a segurança das edificações.

Tabela 7 - Cargas variáveis dos ambientes

CARGAS VARIÁVEIS	
Quartos, sala, banheiros e varanda (kN/m ²)	1,50
Cozinha e área de serviço (kN/m ²)	2,00
Cobertura (kN/m ²)	1,00
Área de circulação e escada (kN/m ²)	2,00
Forro (kN/m ²)	0,10

Fonte: Adaptado pelo autor (2024)

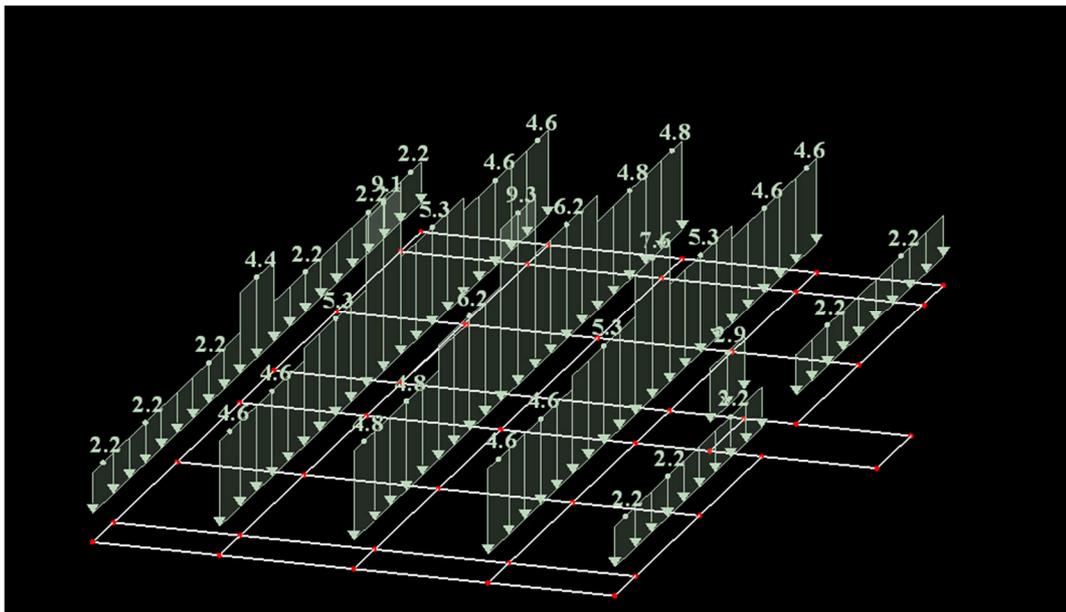
3.3.2.1. Sobrecarga de utilização do apartamento

A análise para distribuição das cargas de sobrecarga de utilização nas áreas do apartamento é realizada de acordo com a Tabela 7, onde se considera o valor de $1,5 \text{ kN/m}^2$ para quartos, salas, banheiros e varanda, e $2,0 \text{ kN/m}^2$ para cozinha e área de serviço. Segundo a norma, o valor recomendado para sobrecargas na cozinha é de $1,5 \text{ kN/m}^2$ e para área de serviço é de 2 kN/m^2 . No entanto, como a cozinha e a área de serviço neste apartamento ocupam um espaço comum, optou-se por adotar a maior sobrecarga entre as duas, que é de 2 kN/m^2 , para toda a área.

Além disso, em áreas de acesso comum, como escadas e áreas de circulação, a norma recomenda uma sobrecarga de 3 kN/m^2 . Com base nos valores discutidos, foi realizada a distribuição das cargas por área de influência, seguindo o sentido de distribuição das cargas das lajes.

Conseqüentemente, a Figura 32 apresenta a distribuição das cargas nas vigas principais do apartamento.

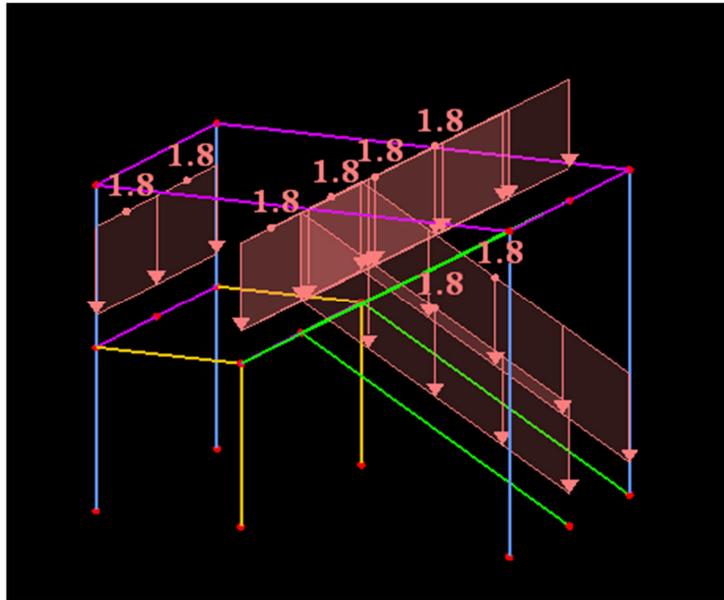
Figura 32 - Distribuição das cargas de utilização do ambiente nas vigas principais



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A análise das cargas na escada foi conduzida utilizando a mesma abordagem previamente descrita. Assim, a Figura 33 ilustra a distribuição das cargas de utilização da escada, seguindo os parâmetros estabelecidos para áreas de comum acesso.

Figura 33 - Distribuição das cargas de utilização da escada



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

3.3.2.2. Cargas do vento

A norma ABNT 6123 (1988) - Forças devido ao vento em edificações, é a referência para os cálculos dos esforços gerados pelo vento em estruturas. É importante destacar que o projeto está localizado na cidade de João Pessoa, Paraíba, em um bairro residencial. A geometria do edifício também desempenha um papel crucial na análise dos esforços do vento, sendo o edifício caracterizado por ter 16 metros de altura, 14,70 metros de largura e 23 metros de comprimento.

As cargas de vento são geradas pela pressão dinâmica que o vento exerce sobre a edificação. O valor da pressão de cálculo é determinado considerando a velocidade característica do vento em condições normais de 1 atm e 15°C. A metodologia para o cálculo desta pressão é especificada na Equação 1.

$$q = 0,613V_k^2 \quad (\text{Equação 1})$$

De modo que,

q : Pressão dinâmica do vento;

V_k : Velocidade característica do vento. A velocidade característica do vento é calculada a partir da Equação 2.

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (\text{Equação 2})$$

De modo que,

V_0 : Velocidade básica do vento, a qual é obtida através do máximo valor da velocidade de um vento com tempo de retorno de 50 anos. A norma 6123 (1988) disponibiliza um mapa do Brasil com as isopletas da velocidade básica do vento, para a cidade de João Pessoa - PB, o valor da velocidade básica do vento é de 30 m/s.;

S_1 : Fator topográfico, leva em consideração as variações do terreno e é obtido pelo item 5.2 da norma 6123 (1988). Neste trabalho foi considerado que a edificação está em um terreno plano, logo o fator topográfico é igual a 1,00;

S_2 : Fator que leva em consideração a rugosidade do terreno e dimensões da edificação. A norma separa a rugosidade do terreno em 5 categorias, a edificação do trabalho se encontra na categoria IV - Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. Para as dimensões horizontais a norma faz a divisão de 3 classes para as edificações, este projeto é categorizado na classe B - Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m. O valor de S_2 é descrito na Equação 3.

S_3 : Fator baseado em conceitos probabilísticos, este fator leva em consideração a probabilidade de a velocidade do vento igualar ou superar a velocidade básica do vento em 50 anos, a norma classifica as edificações em grupo de acordo com suas finalidades, neste trabalho a edificação é do grupo 2 - Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação. Com isso o valor de S_3 é igual a 1,00.

$$S_2 = b \cdot F_R \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (\text{Equação 3})$$

Em que z corresponde à altura acima do chão, já os demais fatores da Equação 6 pode ser retirado da Figura 34 que foi retirada da norma. O fator F_R é obtido exclusivamente pela categoria II.

Figura 34 - Fatores para obtenção de S_2

Categoria	z_g (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		F_r	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Fonte: NBR 6123 (1988)

O valor de S_2 varia com altura calculada, de modo que em alturas maiores seu valor é maior. Isto implica que a pressão dinâmica, a qual é diretamente proporcional ao fator S_2 , é maior com o aumento da altura. Dessa forma, foi gerado a Tabela 8 que sintetiza o valor de S_2 para os níveis do edifício.

Tabela 8 - Valores de S_2

Fator S_2	
Z(m)	Fator S_2
3	0,72
6	0,78
9	0,82
12	0,85
14	0,87
16	0,88

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Com as informações levantadas é possível calcular a velocidade característica do vento através da Equação 4. Dessa forma foi obtido a Tabela 9 com os valores da velocidade característica do vento para os níveis do edifício.

Tabela 9 - Valores do vento característico

Velocidade característica do vento	
Z(m)	V_k (m/s)
3	21,50
6	23,44
9	24,66
12	25,57
14	26,06
16	26,50

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Utilizando as velocidades características do vento, é possível calcular os valores da pressão dinâmica do vento que atuam em diferentes níveis do edifício. Esses cálculos são realizados por meio da Equação 1. A partir desses cálculos, a Tabela 10 apresenta os resultados obtidos para a pressão dinâmica do vento em cada nível do edifício.

Tabela 10 - Valores da pressão dinâmica do vento

Pressão dinâmica do vento	
Z(m)	q (N/m²)
3	283,32
6	336,92
9	372,87
12	400,67
14	416,41
16	430,55

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A pressão dinâmica do vento resultará em cargas de vento sobre a estrutura, conhecidas como forças de arrasto do vento. Essas cargas serão aplicadas de forma pontual nos pórticos do edifício. O valor dessas forças de arrasto será calculado utilizando a Equação 4.

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_e \quad (\text{Equação 4})$$

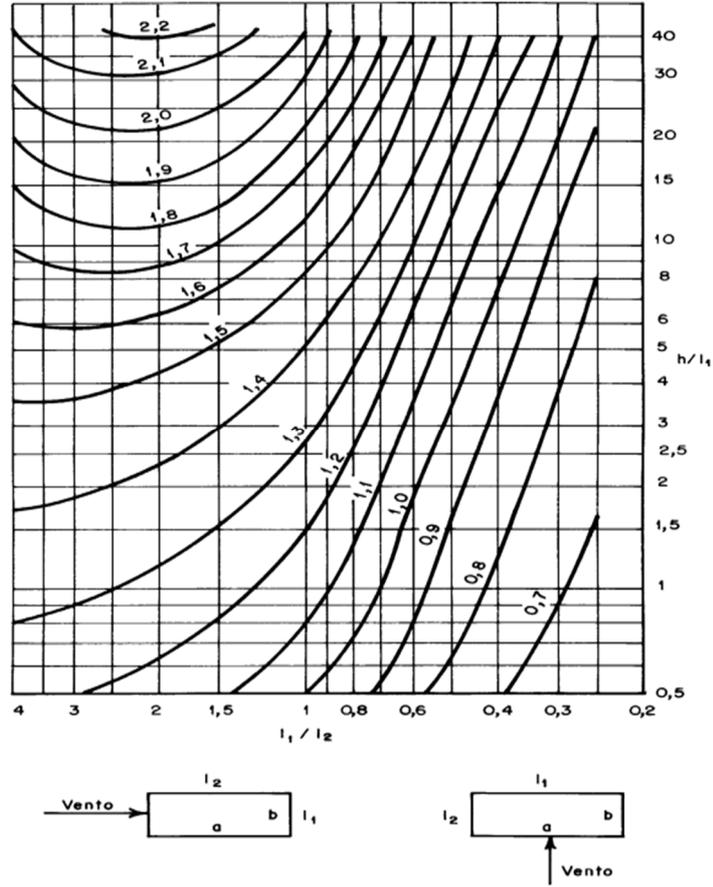
De modo que,

F_a : Força de arrasto do vento;

C_a : O coeficiente de arrasto é um parâmetro crucial que é determinado com base na Figura 35, extraída da norma pertinente. Este coeficiente considera a direção do vento, as dimensões da edificação e a altura do edifício. A determinação do valor no ábaco é realizada utilizando as proporções de “h/l1” no eixo vertical “l1/l2” no eixo horizontal, onde “h” representa a altura do edifício, “l1” é a dimensão do edifício perpendicular ao vento incidente, e “l2” é a dimensão paralela ao vento incidente. Essas relações ajudam a calcular o iMPacto do vento com precisão, levando em conta o perfil e a orientação específica do edifício em relação às correntes de vento.

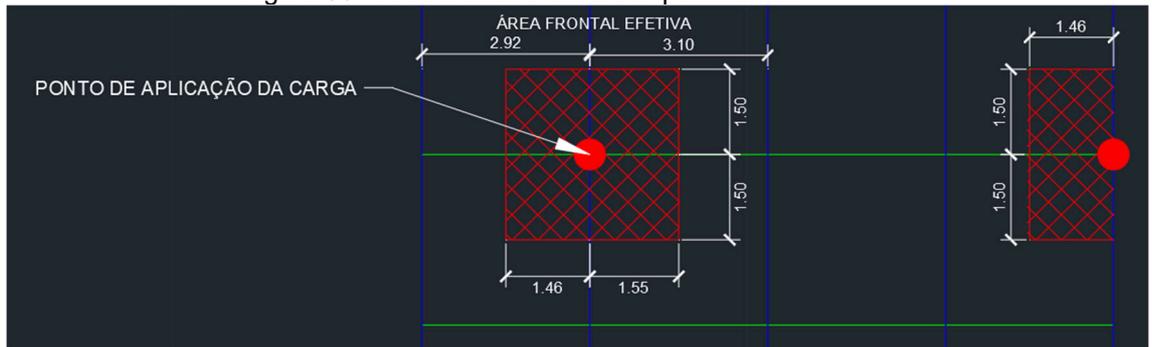
A_e : A área frontal efetiva é a área que influencia o ponto estudado para a obtenção da força de arrasto. Neste trabalho, considerou-se retângulos de largura “l” e altura “h”, determinados pela metade da distância entre os elementos estruturais de um pórtico. Para os elementos estruturais centrais, a dimensão do retângulo é calculada somando a metade das distâncias dos elementos estruturais adjacentes a eles. Este procedimento é ilustrado na Figura 36. Para as estruturas localizadas na cobertura, adiciona-se um metro à altura do retângulo devido às platibandas. A Tabela 11 sintetiza as áreas frontais efetivas nos pórticos.

Figura 35 - Ábaco de obtenção do coeficiente de arrasto



Fonte: NBR 6123 (1988)

Figura 36 - Área frontal efetiva dos pavimentos



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 11 - Valores da área frontal efetiva

Área frontal efetiva		
PÓRTICO	Ae	Ae (coberta)
A	11,07	9,225
B	13,44	11,2
C	9,93	8,275

Área frontal efetiva		
D	9,93	8,275
E	13,44	11,2
F	11,07	9,225
0	4,92	4,1
1	4,92	4,1
2	9,03	7,525
3	9,3	7,75
4	9,03	7,525
5	4,92	4,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Na Tabela 12 são demonstrados os valores de entrada para o ábaco da Figura 35, bem como os valores do coeficiente de arrasto para o vento incidindo a 0° e 90°.

Tabela 12 - Valores do coeficiente de arrasto

Coeficiente de arrasto		
-	Vento 0°	Vento 90°
h/l1	1,09	0,6956521739
l1/l2	0,64	1,56462585
Ca	1,00	1,2

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Com os valores obtidos, é possível calcular as forças de arrasto do vento em duas orientações distintas. Neste trabalho, foram considerados ventos incidindo a 0° e a 90°. O vento a 0° atua na direção de menor dimensão horizontal do edifício, enquanto o vento a 90° atua na direção de maior dimensão horizontal do edifício. Os valores das forças resultantes para essas orientações de vento estão sintetizados nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13 - Valores da força do vento a 0°

Vento de 0° (kN)						
Cota (m)	Pórtico					
	0	1	2	3	4	5
3	1,39	1,39	2,56	2,63	2,56	1,24
6	1,66	1,66	3,04	3,13	3,04	1,48

Vento de 0° (kN)						
Cota (m)	Pórtico					
	0	1	2	3	4	5
9	1,83	1,83	3,37	3,47	3,37	1,63
12	1,97	1,97	3,62	3,11	3,02	1,46
14	2,05	2,05	3,76	-	-	-
16	1,77	1,77	3,24	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

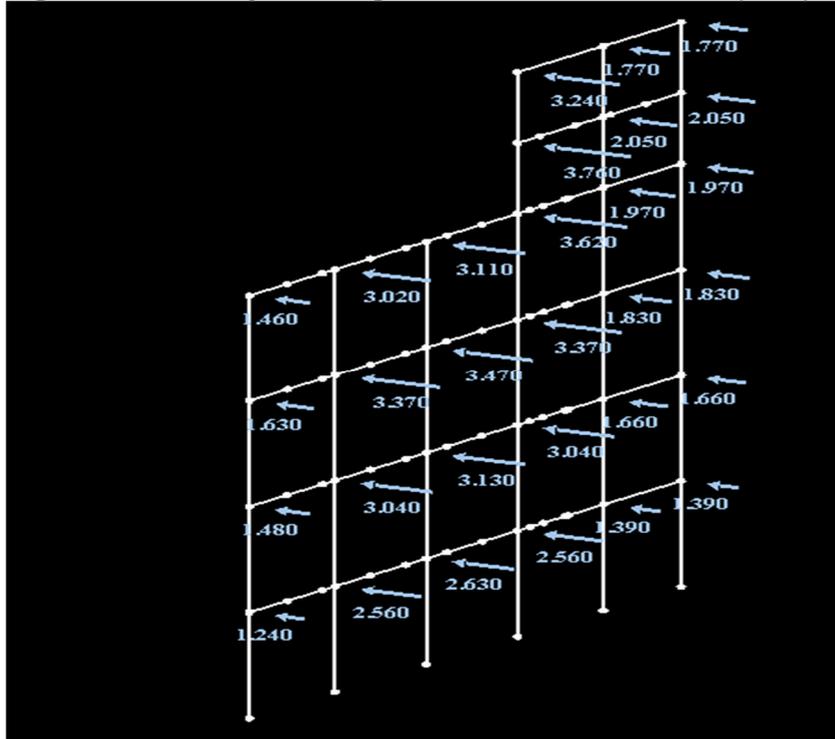
Tabela 14 - Valores da força do vento a 90°

Vento de 90° (kN)						
Cota (m)	Pórtico					
	A	B	C	D	E	F
3	3,14	3,81	2,81	2,81	3,81	3,14
6	3,73	4,53	3,35	3,35	4,53	3,73
9	4,13	5,01	3,70	3,70	5,01	4,13
12	3,70	4,49	3,98	3,98	4,49	3,70
14	-	-	4,13	4,13	-	-
16	-	-	3,56	3,56	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

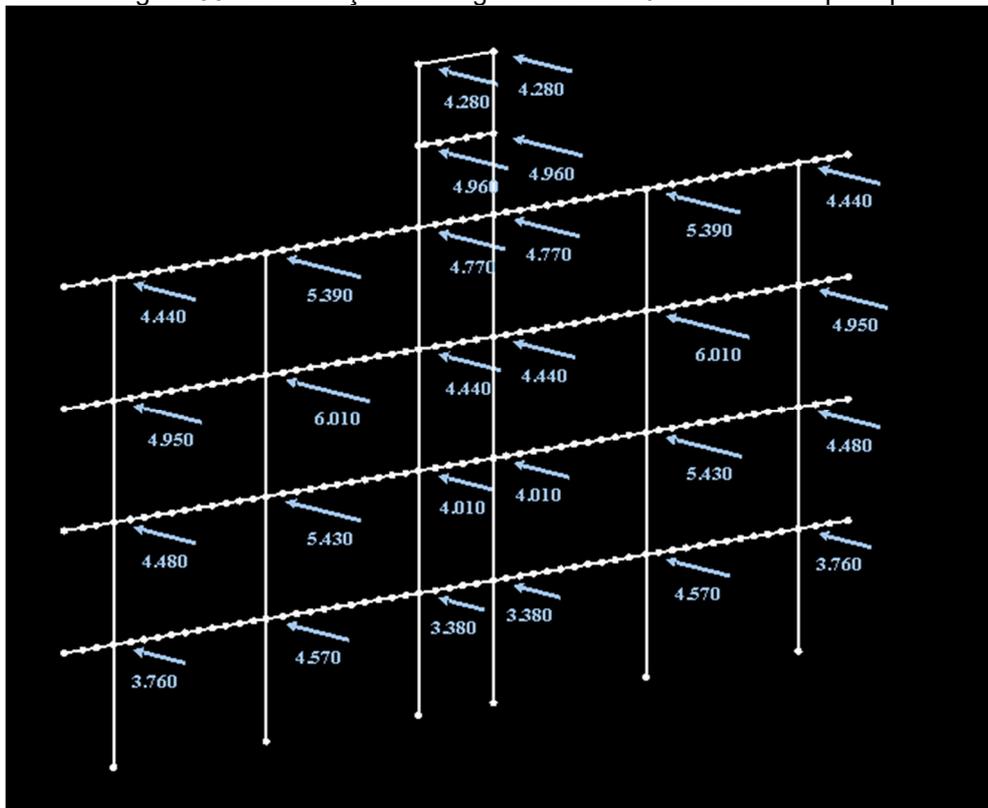
Com base nos cálculos realizados, as Figuras 37 e 38 foram criadas para ilustrar a distribuição das cargas de vento na estrutura do edifício.

Figura 37 - Distribuição da carga do vento a 90° na estrutura principal



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 38 - Distribuição da carga do vento a 0° na estrutura principal



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

3.3.3. Combinações de cargas

No cálculo de combinações de cargas, são considerados os estados limites último (ELU) e de serviço (ELS). O ELU é crucial para assegurar que as peças estruturais não sofram danos permanentes que possam comprometer parcial ou totalmente a integridade da estrutura. Já os ELS são importantes para garantir o desempenho adequado da estrutura ao longo de sua vida útil, assegurando conforto e segurança aos usuários.

A norma ABNT NBR 8681 (2004) - Ações e segurança nas estruturas - Procedimento, é o documento que orienta a combinação de ações nas estruturas. O método para obter as combinações de ações normais de estado limite último é detalhado na Equação 5, fornecendo uma base normativa para o correto dimensionamento e verificação estrutural.

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} F_{Gi} + \gamma_q [F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} F_{Qj,k}] \quad (\text{Equação 5})$$

De modo que,

F_{Gi} : Valor característicos das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$: Valor característica da ação variável considerada como principal;

$F_{Qj,k}$: Valor característico das demais ações variáveis;

γ_{Gi} : Fator de ponderação das ações permanentes. Na norma ABNT NBR 7190-1 (2022) é dado o valor de $\gamma_G = 1,25$ para madeiras industrializadas. (Coeficiente de ponderação para combinações últimas normais de elementos industrializados de madeira);

γ_q : Coeficiente de ponderação das ações variáveis, retirado da norma seu valor corresponde a 1,4 (Coeficiente de ponderação para ações variáveis conjuntamente de edifícios tipo 2);

ψ_{0j} : Coeficiente de combinação entre ações variáveis. Os valores deste coeficiente dependem da natureza da ação e são retirados da Figura 39, a qual foi retirada da norma 8681 (2004).

Figura 39 - Coeficientes de ponderação das cargas variáveis

Ações	ψ_0	ψ_1	$\psi_2^{(3), 4)}$
Cargas acidentais de edifícios			
Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ¹⁾	0,5	0,4	0,3
Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ²⁾	0,7	0,6	0,4
Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento			
Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0

Fonte: NBR 8681 (2004)

Na Equação 6 é descrito as combinações frequentes de serviço.

$$F_d = \sum_{i=1}^m F_{Gi} + \psi_1 F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{2j} F_{Qj,k} \quad (\text{Equação 6})$$

De modo que ψ_1 e ψ_2 São fatores de redução de ações favoráveis, cujos valores dependem da natureza e da duração da carga. Esses valores podem ser obtidos através da Figura 39. Nas combinações quase permanentes, todos os fatores de redução para ações variáveis são iguais a ψ_2 .

A Tabela 15 resume os fatores utilizados nas combinações utilizadas. Importante ressaltar que só é considerado uma orientação do vento na combinação de ações.

Tabela 15 - Fatores de combinação de cargas considerados

COMBINAÇÃO DE AÇÕES						
-----	Ação Variável principal	γ_G	γ_q	ψ_0	ψ_1	ψ_2
ELU (Combinação normal)	Sobrecarga	1,25	1,4	0,6	-	-
	Vento	1,25	1,4	0,7	-	-
ELS (Combinação quase permanente)	-	-	-	-	-	0,3 (sobrecarga) e 0,0 (vento)
ELS	Sobrecarga	-	-	-	0,4	0

COMBINAÇÃO DE AÇÕES						
(Combinação frequente)	Vento	-	-	-	0,3	0,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4. PROCEDIMENTO DE DIMENSIONAMENTO DAS PEÇAS ESTRUTURAIS

Neste capítulo, abordaremos os procedimentos para o cálculo e dimensionamento de peças estruturais em madeira. Inicialmente, é necessário determinar a resistência de cálculo da madeira, um processo que ajusta a resistência característica da madeira considerando a natureza das cargas e a umidade do ambiente, e posteriormente aplica um coeficiente de redução.

As peças estruturais analisadas para dimensionamento incluem vigas e pilares, mãos francesas e pilaretes da escada. As lajes, fornecidas pelo catálogo, não requerem dimensionamento próprio, sendo apenas necessário verificar se a sobrecarga atuante está abaixo do limite máximo estabelecido.

As vigas são solicitadas à compressão e à tração na direção paralela às fibras, devido a tensões de momento e esforços normais. Adicionalmente, as vigas estão sujeitas a esforços de cisalhamento na direção normal às fibras por forças verticais e na direção paralela por forças horizontais. Vigas esbeltas de madeira podem sofrer de flambagem lateral, uma forma de instabilidade que resulta em deslocamentos laterais e torção.

As peças comprimidas enfrentam desafios adicionais, como esforços de compressão e flexocompressão, que podem levar à flambagem por flexão.

A modelagem da estrutura foi realizada utilizando as plantas apresentadas no trabalho, considerando as cargas discutidas anteriormente, com o auxílio do software Dlubal RFEM. A análise resultará nos esforços atuantes na estrutura.

Os critérios de dimensionamento foram estabelecidos de acordo com a norma ABNT NBR 7190-1 (2022) - Projeto de estruturas de madeira. O dimensionamento será focado nos elementos estruturais mais críticos, que são os mais solicitados; demais elementos adotarão medidas equivalentes às dos elementos críticos para garantir consistência e segurança estrutural.

4.1.Procedimento de cálculo para as propriedades físicas da madeira

No item 5.8 da norma ABNT NBR 7190-1 (2022) é apresentado o procedimento para obtenção dos valores de cálculo de resistência de propriedades da madeira. No item 5.8.3 da norma é mostra a Equação 7, a qual define os valores de cálculo de resistência.

$$X_d = K_{mod} \cdot \frac{X_k}{\gamma_w} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

X_d : Resistência de cálculo de uma propriedade genérica da madeira;

K_{mod} : Coeficiente de modificação que altera os valores característicos da madeira em função da classe de carregamento e da classe de umidade do ambiente Seu valor é obtido pela multiplicação de dois fatores o K_{mod1} e o K_{mod2} , os quais têm valores obtidos por Tabelas. O primeiro é obtido pela Figura 40 e depende da classe do carregamento e o tipo do material utilizado. O segundo é obtido pela Figura 41 e depende da classe de umidade (obtida pela Figura 42) e do tipo de material utilizado. Um terceiro termo aparece para MLC, o K_{mod3} (exposto mais adiante) e deve ser acrescido aos outros fatores em uma multiplicação simples.

X_k : Valor característico de resistência de uma propriedade da madeira é considerado igual ao valor característico inferior o $X_{k,inf}$, que é o valor que tem 5% de probabilidade de não ser atingido em um lote de madeira.

γ_w : Coeficiente de minoração das propriedades da madeira. Para ELU em tensões normais tem valor igual 1,4 e para tensões de cisalhamento tem valor igual a 1,8. Para ELS seu valor é igual a 1.

Figura 40 - Valores de K_{mod1} Tabela 4 – Definição de classes de carregamento e valores de k_{mod1}

Classes de carregamento	Ação variável principal da combinação		Tipos de madeira	
	Duração acumulada	Ordem de grandeza da duração acumulada da ação característica	Madeira serrada Madeira roliça Madeira lamelada colada (MLC) Madeira lamelada colada cruzada (MLCC) Madeira laminada colada (LVL)	Madeira recomposta
Permanente	Permanente	Mais de dez anos	0,60	0,30
Longa duração	Longa duração	Seis meses a dez anos	0,70	0,45
Média duração	Média duração	Uma semana a seis meses	0,80	0,65
Curta duração	Curta duração	Menos de uma semana	0,90	0,90
Instantânea	Instantânea	Muito curta	1,10	1,10

Fonte: NBR 7190-1 (2022)

Figura 41 - Fatores de K_{mod2} Tabela 5 – Valores de k_{mod2}

Classes de umidade	Madeira serrada Madeira roliça Madeira lamelada colada (MLC) Madeira lamelada colada cruzada (MLCC) Madeira laminada colada (LVL)	Madeira recomposta
(1)	1,00	1,00
(2)	0,90	0,95
(3)	0,80	0,93
(4)	0,70 ^a	0,90

^a Não é permitido o uso do MLCC para classe de umidade (4).

Fonte: NBR 7190-1 (2022)

Figura 42 - Valores de classe de umidade

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Umidade de equilíbrio máxima da madeira U_{eq}
1	$U_{amb} \leq 65 \%$	12 %
2	$65 \% < U_{amb} \leq 75 \%$	15 %
3	$75 \% < U_{amb} \leq 85 \%$	18 %
4	$U_{amb} > 85 \%$ durante longos períodos	$\geq 25 \%$

Fonte: NBR 7190-1 (2022)

O fator K_{mod3} é obtido através de uma multiplicação de outros três fatores, como mostra a Equação 8.

$$K_{mod3} = C_e \cdot C_c \cdot C_t \quad (\text{Equação 8})$$

De modo que,

C_e :Coeficiente de emendas de entalhes múltiplos, seu valor é igual a 0,95 para peças com emendas de entalhes múltiplos, já em peças sem emendas longitudinais seu valor é igual a 1,00;

C_c :Coeficiente de redução devido a curvaturas, neste trabalho seu valor será igual a 1,00; pois só teremos peças retas;

C_t :Coeficiente de alteração devido a temperatura em uso, seu valor é obtido através da Figura 43.

Figura 43 - Valores de coeficiente de alteração devido a temperatura (CT)

Tipo de propriedade	Teor de umidade da madeira em serviço	Temperatura ambiente °C		
		°C ≤ 38	38 < °C ≤ 52	52 < °C ≤ 66
Tração paralela e módulo de elasticidade	Seca ou úmida	1,0	0,9	0,9
Demais propriedades e ligações	Seca < 16 %	1,0	0,8	0,7
	Úmida ≥ 16 %	1,0	0,7	0,5

Fonte: NBR 7190-1 (2022)

Nos cálculos de ELU para estabilidade lateral da viga é preciso calcular o módulo de elasticidade efetivo ($E_{0,ef}$), o qual é obtido pela multiplicação entre o coeficiente de modificação (K_{mod}) e o módulo de elasticidade médio ($E_{0,med}$). Nas verificações do ELS o valor utilizado é o $E_{0,med}$.

4.2. Verificações do Estados limites últimos

A seguir será apresentado o procedimento e critérios de dimensionamento das peças estruturais para verificações de estado de limite últimos.

4.2.1. Solicitações normais

As solicitações normais são oriundas de tração, compressão, flexão reta, flexocotração e flexocompressão.

- Tração

O critério de segurança de peças submetidas a tração pura está descrito na Equação 9.

$$\sigma N_{t,d} = \frac{N_{t,d}}{A} \leq f_{t,od} \quad (\text{Equação 9})$$

De modo que:

$\sigma N_{t,d}$: Valor de cálculo da tensão de tração normal à seção transversal;

$N_{t,d}$: Valor de cálculo do esforço normal de tração;

A : Área líquida da seção transversal.

$f_{t,od}$: Valor de cálculo de resistência de tração paralela às fibras

- Compressão

O critério de segurança de peças submetidas a compressão pura está descrito na Equação 10.

$$\sigma N_{c,d} = \frac{N_{c,d}}{A} \leq f_{c,od} \quad (\text{Equação 10})$$

De modo que:

$\sigma_{N_{c,d}}$: Valor de cálculo da tensão de compressão normal à seção transversal;

$N_{c,d}$: Valor de cálculo do esforço normal de compressão;

$f_{c,od}$: Valor de cálculo de resistência de compressão paralela às fibras.

- Flexão reta

O critério de segurança de peças submetidas à flexão reta está descrito na Equação 11.

$$\frac{\sigma_{M,d}}{f_{m,d}} = \frac{M_d}{W} \leq 1 \quad (\text{Equação 11})$$

De modo que:

$\sigma_{M,d}$: Valor de cálculo da tensão de flexão, a qual vale $\frac{M_d}{W}$;

$f_{m,d}$: Valor de cálculo de resistência de flexão;

M_d : Valor de cálculo do momento fletor atuante;

W : Módulo de resistência da seção transversal.

- Flexotração

O critério de segurança de peças submetidas a flexotração está descrito na Equação 12 ou 13, a mais rigorosa entre as duas.

$$\frac{\sigma_{N_{t0,d}}}{f_{t0,d}} + \frac{\sigma_{M_{x,d}}}{f_{m,d}} + K_m \frac{\sigma_{M_{y,d}}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (\text{Equação 12})$$

$$\frac{\sigma_{N_{t0,d}}}{f_{t0,d}} + K_m \frac{\sigma_{M_{x,d}}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{M_{y,d}}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (\text{Equação 13})$$

De modo que:

$\sigma_{N_{t0,d}}$: Valor de cálculo da tensão de tração oriunda da força normal de tração;

K_m : Valor de correção igual a 0,7 para seções retangulares.

- Flexocompressão

O critério de segurança de peças submetidas a flexocompressão está descrito na Equação 14 ou 15, a mais rigorosa entre as duas.

$$\left(\frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + K_m \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (\text{Equação 14})$$

$$\left(\frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + K_m \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (\text{Equação 15})$$

De modo que:

$\sigma_{Nc0,d}$: Valor de cálculo da tensão de compressão oriunda da força normal de compressão;;

4.2.2. Solicitação ao cisalhamento

O cisalhamento em estruturas de madeiras é oriundo dos esforços cortantes.

- Cisalhamento longitudinal em vigas retangulares

As vigas retangulares submetidas à flexão com esforço cortante têm como critério de segurança a Equação 16.

$$\tau_d = 1,5 \cdot \frac{V_d}{A} \leq f_{V,0d} \quad (\text{Equação 16})$$

De modo que:

τ_d : Máxima tensão de cisalhamento de cálculo;

V_d : Esforço máximo cortante de cálculo;

$f_{V,0d}$: Resistência de cálculo ao cisalhamento.

4.2.3. Estabilidade

Alguns critérios de estabilidade devem ser considerados para garantir a segurança da estrutura, em que será analisada a esbeltez, esbeltez relativa e estabilidade lateral das vigas de seção retangular.

- Esbeltez

O índice de esbeltez é um parâmetro crucial para avaliar o risco de flambagem em elementos estruturais. Ele indica que quanto mais esbelto for o elemento, maior é a probabilidade de ocorrer flambagem. Conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 7190-2022, o índice de esbeltez para peças de madeira comprimidas não deve exceder 140. Esse limite ajuda a garantir a estabilidade estrutural e a integridade dos elementos sob compressão. Dessa forma, a Equação 17 na norma apresenta o critério de segurança que deve ser aplicado para verificar a adEquação da esbeltez das peças comprimidas, assegurando que estejam dentro dos limites aceitáveis para prevenir a flambagem.

$$\lambda = \frac{L_0}{\sqrt{I/A}} \leq 140 \quad (\text{Equação 17})$$

De modo que:

L_0 : Comprimento de flambagem. O comprimento de flambagem depende da distância das ligações da barra e os tipos de vinculação. Seu valor é obtido através da Equação 18, em que o K_E é obtido de acordo com a Figura 44, qual foi retirada da norma. L é o comprimento da barra analisada.

I : Momento de inércia da peça.

$$L_0 = K_E \cdot L \quad (\text{Equação 18})$$

Figura 44 - Coeficientes de flambagem

Modos de flambagem						
Valores de projeto para K_E	0,65	0,80	1,20	1,00	2,10	2,40
Código das condições de extremidade		Rotação e translação lateral impedidas, translação vertical livre				
		Rotação e translação vertical livres, translação lateral impedida				
		Rotação livre e translações impedidas				
		Rotação impedida e translações livres				
		Rotação e translações livres				

Fonte: NBR 7190 (2022)

- Esbeltez relativa

Em estruturas de madeira sujeitas a compressão e flexocompressão, é crucial estudar a esbeltez relativa das peças. Quando o valor da esbeltez relativa excede 0,3, são necessárias considerações adicionais aos critérios de segurança estabelecidos.

O valor da esbeltez relativa é calculado utilizando as Equações 19 e 20.

$$\text{Em x: } \lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \leq 0,3 \quad (\text{Equação 19})$$

$$\text{Em y: } \lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \leq 0,3 \quad (\text{Equação 20})$$

De modo que:

$\lambda_{rel,x}$ e $\lambda_{rel,y}$: Índices de esbeltez relativa à flexão;

λ_x e λ_y : Índices de esbeltez relativa aos eixos x e y;

$E_{0,05}$: Valor característico do módulo de elasticidade.

Em situações onde o valor da esbelteza relativa excede 0,3 em qualquer direção, além de atender às verificações de compressão e flexocompressão já discutidas, torna-se necessário realizar verificações adicionais conforme as Equações 21 e 22.

$$\frac{\sigma_{Nco,d}}{K_{cx} \cdot f_{co,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + K_m \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (\text{Equação 21})$$

$$\frac{\sigma_{Nco,d}}{K_{cy} \cdot f_{co,d}} + K_m \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (\text{Equação 22})$$

De modo que:

K_{cx} e K_c são coeficientes determinados pelas Equações 23 e 24.

$$K_{cx} = \frac{1}{K_x + \sqrt{K_x - (\lambda_{rel,x})^2}} \quad (\text{Equação 23})$$

$$K_{cy} = \frac{1}{K_y + \sqrt{K_y - (\lambda_{rel,y})^2}} \quad (\text{Equação 24})$$

De modo que:

K_x e K_y são coeficientes determinados pelas Equações 25 e 26. Este coeficiente depende do termo β_c que vale 1,00 para madeiras laminadas coladas.

$$K_x = 0,5 \left[1 + \beta_c (\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2 \right] \quad (\text{Equação 25})$$

$$K_y = 0,5 \left[1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + (\lambda_{rel,y})^2 \right] \quad (\text{Equação 26})$$

- Estabilidade lateral das vigas de seção retangular

Além das demais condições discutidas, as vigas sujeitas a flexão podem sofrer com flambagem lateral com torção. A flambagem lateral com torção surge, pois, a parte comprimida da viga devido a flexão tende a se deslocar lateralmente, enquanto que a parte tracionada tende a ficar estabilizada. Com isso, surgem um ângulo ϕ de rotação da parte comprimida da viga em relação ao eixo original da viga, conforme ilustra a Figura 48, o que faz surgir o efeito da torção.

Esta consideração dessa ação pode ser dispensada caso seja atendida a Equação 27.

$$\frac{L_1}{b} \leq \frac{E_{0,ef}}{B_M f_{m,d}} \quad (\text{Equação 27})$$

De modo que:

L_1 : A distância da viga entre os pontos de deslocamentos laterais impedidos.

B_M : Coeficiente de correção, obtido pela Figura 45, retirada da norma.

Figura 45 - Valores Tabelados para o coeficiente de correção

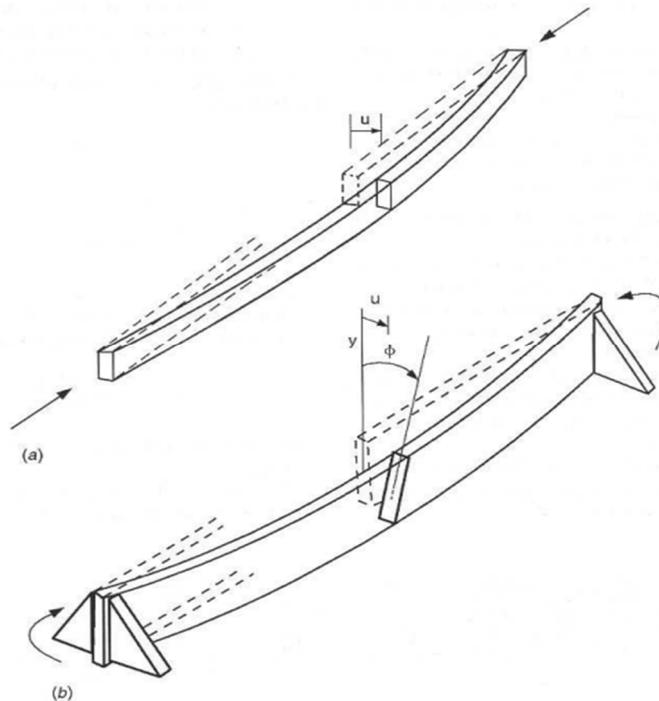
h/b	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
β_M	6	8,8	12,3	15,9	19,5	23,1	26,7	30,3	34	37,6	41,2	44,8	48,5	52,1	55,8	59,4	63	66,7	70,3	74

Fonte: NBR 7190 (2022)

Caso essa verificação não seja atendida, a norma também possibilita utilização da Equação 28 para dispensar o efeito de flambagem lateral com torção.

$$\sigma_{c,d} \leq \frac{E_{0,ef}}{\frac{L_1}{b} B_M} \quad (\text{Equação 28})$$

Figura 46 - Flambagem lateral com torção



Fonte: Pfeil (2003)

4.3. Estado de limite de serviço

O estado de limite de serviço considera a utilização rotineira do pavimento, analisando o comportamento da estrutura em seu uso diário para evitar danos e a perda precoce de resistência. Neste estado, são analisadas principalmente a deflexão (flecha) e as vibrações dos elementos estruturais.

Neste trabalho, a análise das flechas foi realizada conforme os critérios ilustrados na Figura 47, que foi retirada diretamente da norma. Esta análise é essencial para garantir que a estrutura atenda aos requisitos de desempenho e conforto, mantendo a segurança e a funcionalidade ao longo de sua vida útil.

Figura 47 - Flechas máximas permissíveis atuantes

Tipo de viga	δ_{inst}	δ_{fin}	$\delta_{net,fin}$
Vigas biapoiadas ou contínuas	L/300 a L/500	L/150 a L/300	L/250 a L/350
Vigas em balanço	L/150 a L/250	L/75 a L/150	L/125 a L/175

Fonte: NBR 7190-1 (2022)

5. PROPRIEDADES DE CÁLCULO DA MADEIRA E MODELAGEM COMPUTACIONAL DO PROJETO

Como discutido anteriormente, as propriedades físicas da madeira usadas no cálculo são ajustadas por um coeficiente de modificação e, em seguida, divididas por um coeficiente de minoração.

- Kmod 1

Para o valor de Kmod1, considerou-se a classe de carregamento de longa duração para madeira MLC. Conforme indicado na Figura 40, o valor de Kmod1 é 0,6.

- Kmod 2

A umidade relativa em João Pessoa é consistentemente alta, ultrapassando 70% durante todo o ano, com alguns meses alcançando uma umidade relativa média

de 83%, conforme dados do período de 1991 a 2021 disponíveis no site CLIMATE DATA. Consequentemente, a classe de umidade para o ambiente é classificada como 3, e a umidade de equilíbrio da madeira é estimada em 18%. Com base nesses fatores, o valor de K_{mod2} , conforme indicado na Figura 41, é de 0,8.

- K_{mod3}

A temperatura média anual em João Pessoa é inferior a 30 °C, de acordo com o CLIMATE DATA, assim $C_t = 1,00$.

Foi considerada a existência de emendas longitudinais na peça de madeira, logo $C_e = 0,95$. Como já dito anteriormente, $C_c = 1,00$, assim:

$$k_{mod3} = 1 \cdot 1 \cdot 0,95 = 0,95$$

Com esses dados aplicou-se a Equação 8 e obteve-se o valor de K_{mod3} igual a 0,95.

5.1. Valores das propriedades de cálculo da madeira

O valor de K_{mod} é a multiplicação dos valores de K_{mod1} , K_{mod2} e K_{mod3} , assim chegou-se a $K_{mod} = 0,456$.

$$k_{mod} = 0,6 \cdot 0,8 \cdot 0,95 = 0,456$$

Os valores de Y_W (Coeficiente de minoração das propriedades da madeira) já foram discutidos anteriormente, com isso aplica-se a Equação 7 nas propriedades apresentadas da madeira que estão apresentadas na Tabela 1. Dessa forma, obteve-se a Tabela 16, representando as propriedades da madeira para elementos em estado de limite último, e a Tabela 17, a qual representa a propriedade da madeira para elementos em estado de limite de serviço.

Tabela 16 - Propriedades da madeira de cálculo da madeira para ELU

PROPIEDADES DE RESISTÊNCIA (MPa) DE CÂLCULO ELU		
k_{mod}		0,46
FLEXÃO	$f_{b,d}$	9,77
TRAÇÃO PARALELA	$f_{t,o,d}$	5,86
TRAÇÃO PERPENDICULAR	$f_{t,90,d}$	0,20
COMPRESSÃO PARALELA	$f_{c,o,d}$	8,14
COMPRESSÃO PERPENDICULAR	$f_{c,90,d}$	2,64
CISALHAMENTO	$f_{v,d}$	1,01
MÓDULO DE ELASTICIDADE EFETIVO	$E_{o,ef}$	5.016

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 17 - Propriedades de cálculo da madeira para ELS

PROPIEDADES DE RESISTÊNCIA (MPa) DE CÂLCULO ELS		
k_{mod}		0,46
FLEXÃO	$f_{b,d}$	13,68
TRAÇÃO PARALELA	$f_{t,o,d}$	8,21
TRAÇÃO PERPENDICULAR	$f_{t,90,d}$	0,27
COMPRESSÃO PARALELA	$f_{c,o,d}$	11,40
COMPRESSÃO PERPENDICULAR	$f_{c,90,d}$	3,69
CISALHAMENTO	$f_{v,d}$	1,82
MÓDULO DE MÉDIO	$E_{o,m}$	11.000

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

5.2. Modelagem computacional

A modelagem da estrutura realizada neste projeto concentrou-se exclusivamente na estrutura principal e nas escadas da edificação, levando em consideração as cargas discutidas anteriormente. As vigas de piso foram analisadas separadamente das estruturas principais, com foco na viga mais solicitada de cada pavimento para garantir uma avaliação detalhada e precisa da resistência e da segurança. Para a análise estrutural e o cálculo das cargas, utilizou-se o software DLUBAL RFEM

A Figura 48 apresenta as propriedades da madeira que foram consideradas na modelagem computacional para as combinações referentes ao estado de limite último, enquanto a Figura 49 ilustra as propriedades da madeira utilizadas para as

combinações de estado de limite de serviço. Além disso, a Figura 50 destaca as propriedades das ligações que foram consideradas na modelagem computacional

Figura 48 - Propriedades da madeira ELU

The screenshot shows the 'Edit Material' dialog box for 'Hardwood Timber D30 TCC'. The 'Material Constants' section is expanded, showing the following values:

Property	Symbol	Value	Unit
Modulus of elasticity	E	5016.0	[MPa]
Shear modulus	G	700.0	[MPa]
Poisson's ratio	ν	6.857	[-]
Specific weight	γ	6.40	[kN/m ³]
Coefficient of thermal expansion	α	5.0000E-06	[1/°C]
Partial safety factor	γ_M	1.00	[-]

The 'Material Model' is set to 'Isotropic Linear Elastic' and the 'Comment' is 'User-Defined Material'. The dialog box has 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom right.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 49 Propriedades da madeira ELS

The screenshot shows the 'Edit Material' dialog box for 'Hardwood Timber D30 TCC'. The 'Material Constants' section is expanded, showing the following values:

Property	Symbol	Value	Unit
Modulus of elasticity	E	11000.0	[MPa]
Shear modulus	G	700.0	[MPa]
Poisson's ratio	ν	6.857	[-]
Specific weight	γ	6.40	[kN/m ³]
Coefficient of thermal expansion	α	5.0000E-06	[1/°C]
Partial safety factor	γ_M	1.00	[-]

The 'Material Model' is set to 'Isotropic Linear Elastic' and the 'Comment' is 'User-Defined Material'. The dialog box has 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom right.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Conforme ilustrado nas Figuras, a madeira utilizada está em conformidade com os valores discutidos anteriormente. É importante ressaltar que, embora o software de modelagem computacional seja capaz de realizar tanto a análise do sistema quanto o dimensionamento das peças de madeira, neste trabalho optou-se por realizar as verificações de segurança manualmente.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Para o dimensionamento em Estado Limite Último (ELU), sempre será considerada a combinação que resulta nas maiores solicitações para a peça estrutural, a fim de garantir a segurança e a integridade da estrutura sob as condições mais críticas.

Na modelagem computacional, foram consideradas oito tipos de combinações de cargas, divididas entre quatro combinações em estado de limite último e quatro em estados de limites de serviço. A Figura 51 apresenta as combinações consideradas, destacando que a primeira carga listada em cada combinação é a carga principal daquela combinação.

Figura 51- Combinações de ações de cálculo consideradas

Existing Load Combinations	
Norm CO1	ELU - sobrecarga + vento 90°
Norm CO2	ELU - sobrecarga + vento 0°
Norm CO3	ELU - vento 90° + sobrecarga
Norm CO4	ELU - vento 0° + sobrecarga
S Qp CO5	ELS - Combinação quase permanent
S Fr CO6	ELS - Sobrecarga
S Fr CO7	ELS - Vento 90° + sobrecarga
S Qp CO8	ELS - vento 0° + sobrecarga

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A análise das vigas secundárias será realizada com o mesmo software e as mesmas combinações de carga. No entanto, apenas a viga crítica, aquela que recebe a maior carga do edifício, será analisada detalhadamente.

5.3. Planilha de dimensionamento

Para facilitar o dimensionamento das peças estruturais, o autor desenvolveu uma planilha de cálculo. Nesta planilha, a entrada de dados é realizada informando o comprimento da peça estrutural, a seleção da mesma e os esforços solicitantes. Esse processo é ilustrado na Figura 52.

Figura 52 - Dados de entrada da planilha de cálculo

ELEMENTO	Exemplo		
COMPRIMENTO	1		
SEÇÃO	b (cm)	15	
	h (cm)	25	
ESFORÇOS DE CÁLCULO	Myd (KNM)	10,00	
	Vd (KN)	15,00	
	Nd (KN)	12,00	

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O resultado obtido ao inserir os dados na planilha de cálculo inclui as verificações da peça estrutural analisada, assegurando que todas as condições estabelecidas neste trabalho sejam atendidas. A Figura 53 exibe os resultados obtidos para os dados inseridos.

Figura 53- Resultados disponível na planilha de cálculo

ELEMENTO	Exemplo		
COMPRIMENTO	1		
SEÇÃO	b (cm)	15	
	h (cm)	25	
ESFORÇOS DE CÁLCULO	Myd (KNM)	10,00	
	Vd (KN)	15,00	
	Nd (KN)	12,00	
INÉRCIA DO ELEMENTO	Ix (cm ⁴)	19.531,25	
	Iy (cm ⁴)	7.031,25	
ESBELTEZ	Yx	13,86	OK
	Yy	23,09	OK
ESBELTEZ RELATIVA	Yrelx	0,23	OK
	Yrely	0,38	VERIFICAÇÕES EXTRAS
ESTABILIDADE LATERAL DAS VIGAS	h/b	1,666666667	OK
	BM	7,69	
	L1/b	6,666666667	
	E0,ef/(BM*fm,d)	66,77	
TRAÇÃO	ft0,d (MPa)	5,86	CAPACIDADE SOLICITADA
	QN,td (MPa)	0,32	5,46%
COMPRESSÃO	fc0,d (MPa)	8,14	CAPACIDADE SOLICITADA
	QN,td (MPa)	NÃO HÁ	0,00%
FLEXÃO RETA	fm,d (MPa)	9,77	CAPACIDADE SOLICITADA
	W (m ³)	1,56E-03	
	Qm,d (MPa)	6,40	65,50%
FLEXOTRAÇÃO	QN,td / ft0,d	0,05	CAPACIDADE SOLICITADA
	Qm,d / fm,d	0,65	
	VERIFICAÇÃO	0,71	70,96%
FLEXOCOMPRESSÃO	QN,cd / fc0,d	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	Qm,d / fm,d	0,65	
	VERIFICAÇÃO	NÃO HÁ	65,50%
VERIFICAÇÕES DE ESBELTEZ RELATIVA	kex	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	key	NÃO HÁ	
	VERIFICAÇÃO 1	NÃO HÁ	65,50%
	VERIFICAÇÃO 2	NÃO HÁ	65,50%
CISALHAMENTO LONGITUDINAL	fv0,d	1,01	
	Td	0,60	CAPACIDADE SOLICITADA
	VERIFICAÇÃO	0,59	59,21%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Quando uma peça estrutural não está sujeita à compressão normal, as verificações adicionais de esbeltez relativa não são necessárias. Na planilha de cálculo, as cargas normais de cálculo são tratadas de forma que valores positivos indicam tração e valores negativos indicam compressão.

6. RESULTADOS PARA ESTADO DE LIMITE ÚLTIMO

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos com análise computacional e será feita as verificações de segurança das peças estruturais.

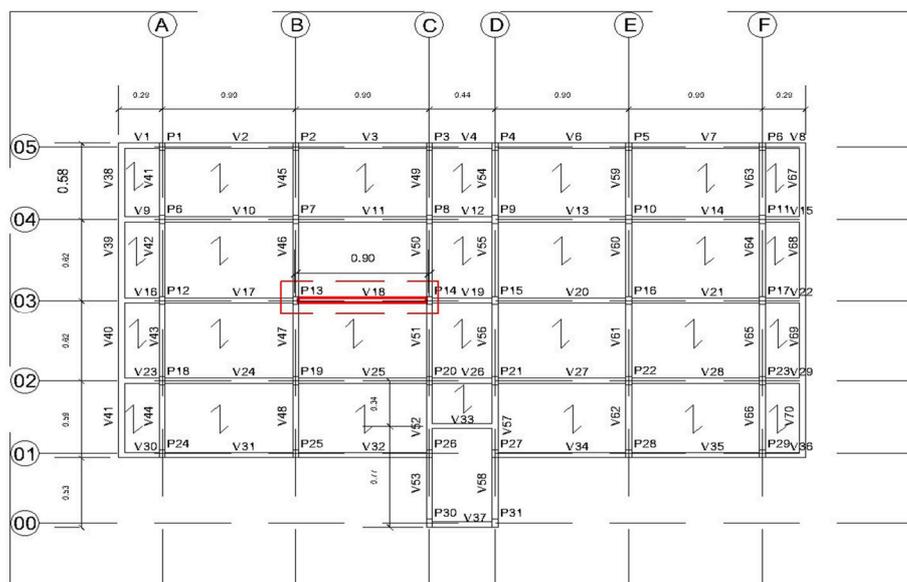
6.1. Vigas principais

Na análise das vigas principais críticas será analisado duas vigas, a primeira atua-se os mais esforços de momento e cortante da estrutura, na segunda atua-se os maiores esforços normais aplicados nas vigas da estrutura.

6.1.1. Viga crítica à momento e esforço cortante

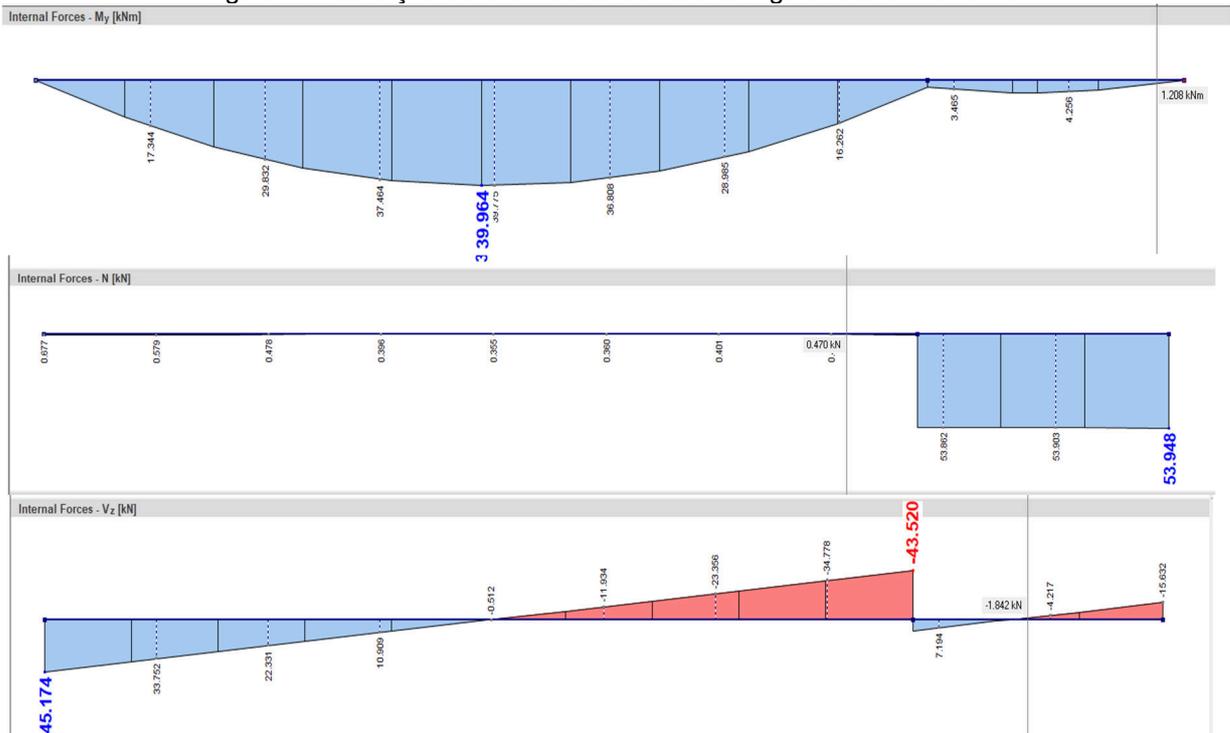
Na análise computacional, verificou-se que a viga V18 está submetida aos maiores esforços de momento fletor e esforço cortante. Conforme apresentado na Figura 54, esta viga sofre um momento fletor máximo de cálculo de 39,964 kNm e um esforço cortante máximo de 45,174 kN. Além disso, uma força de tração de 53,948 kN atua sobre ela, como detalhado na Figura 55. A viga possui 4,48 metros de comprimento e os esforços resultam do estado de limite último, com a sobrecarga atuando como carga principal e o vento a 90° como carga secundária.

Figura 54- Identificação de viga crítica à momento e a cortante



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 55- Esforços solicitantes de cálculo da viga crítica à momento



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

6.1.1.1. Verificações de estabilidade – viga crítica à momento e a cortante

Nas verificações de estabilidade serão analisados a esbeltez, a esbeltez relativa e a estabilidade lateral da viga.

- Esbeltez

A viga possui dimensões de 20 x 37,5 cm e 4,48 metros, com a inércia da viga descrita na Tabela 2, pela Equação 17 temos que a esbeltez da viga na direção X é de 41,38 e na direção Y 77,60.

$$\lambda_x = \frac{4,48}{\sqrt{\frac{87890,63}{750}}} = 41,38$$

$$\lambda_y = \frac{4,48}{\sqrt{\frac{25000}{750}}} = 77,60$$

Portanto, como as esbeltezes foram menores que 140, a viga passa na verificação de esbeltez.

- Esbeltez relativa

A esbeltez relativa leva em consideração, além das dimensões da viga, o valor de resistência à compressão característica da madeira, valor descrito na Tabela 1, logo, pelas Equações 19 e 20, o valor da esbeltez relativa em X é de 0,74 e em Y é de 1,29.

$$\lambda_x = \frac{41,38}{\pi} \sqrt{\frac{25}{9200}} = 0,69$$

$$\lambda_y = \frac{77,60}{\pi} \sqrt{\frac{25}{9200}} = 1,29$$

Com esses valores, seria necessário fazer considerações extras nas verificações na viga, entretanto como a viga sofre de esforços de tração normal, será verificado apenas a flexotração.

- Estabilidade lateral da viga

Para a estabilidade lateral das vigas, precisa-se do módulo de elasticidade específico e da resistência à flexão de cálculo da madeira, ambos mostrados na Tabela 16, além disso, utiliza-se coeficiente de correção que retirado da Figura 47, nesse caso com valor igual a 8,37.

Com isso, ao utilizar a Equação 27 teve-se como resultado: $22,4 < 61,33$. Logo, a inequação é verdadeira e a viga é dita com estabilidade lateral.

$$\frac{4,48}{0,20} \leq \frac{5016}{8,37 \cdot 9,77} = 22,4 \leq 61,33$$

6.1.1.2. Verificações de solicitações normais - viga crítica à momento e a cortante

Nas verificações de estabilidade serão analisados a tração, compressão, flexotração, flexocompressão.

- Tração

A viga sofre com esforço de tração de cálculo de 53,948 kN. Aplicando-se a Equação 9 temos que: 0,72 MPa < 5,86 MPa. Logo, como a inequação é verdadeira a viga passa para solicitação de tração com sua capacidade de solicitação igual a 12,27%.

$$\frac{53,95}{750} \cdot 10 \leq 5,86 = 0,72 \leq 5,86$$

- Compressão

A viga não sofre de esforços de compressão.

- Flexão reta

A viga é solicitada a um momento fletor de cálculo de 39,964 kNm. Dessa forma, aplicando-se a Equação 11 temos que: 0,87 < 1. Logo, como a inequação é verdadeira a viga passa na solicitação de flexão com sua capacidade de solicitação igual a 87,25%.

$$\frac{39,964}{\frac{4,69 \cdot 10^{-3}}{9,77 \cdot 10^3}} \leq 1 = 0,87 \leq 1$$

- Flexotração

A viga só possui esforços de momentos M_y , assim dispensa-se a utilização da Equação 12 para verificação de flexotração.

Com isso, resta fazer a verificação da Equação 13, a qual obtém-se que: $0,995 < 1$. Logo, como a inequação é verdadeira, a viga passa nas solicitações de flexotração com sua capacidade de solicitação igual a 99,52%.

$$\frac{0,72}{5,86} + 0 + \frac{8,53}{9,77} \leq 1 = 0,123 + 0,873 + 0 \leq 1 = 0,995 \leq 1$$

- Flexocompressão

Como a viga não sofre de compressão normal, a verificação de flexocompressão pode ser dispensada.

6.1.1.3. Verificação de cisalhamento - viga crítica à momento e a cortante

A viga é solicitada a um esforço cortante de cálculo 45,174 kN. Com isso, ao aplicar a Equação 16, temos como resultado que: $0,90 \text{ MPa} < 1,01 \text{ MPa}$.

$$1,5 \cdot \frac{45,17}{750} \cdot 10 \leq 1,01 = 0,90 \leq 1,01$$

Portanto, como a inequação é verdadeira a viga passa na solicitação de cisalhamento longitudinal com sua capacidade de aproveitamento em 89,16 %.

6.1.1.4. Resumo de cálculo - viga crítica à momento e a cortante

A Tabela 18 sintetiza os valores discutidos para a viga estudada, percebe-se que ela passou em todas verificações e dessa forma, pode-se dizer que a viga é segura para a construção do edifício.

Tabela 18 - Resumo de cálculo da viga V18

ELEMENTO	V18	
COMPRIMENTO DO ELEMENTO (m)	4,48	
SEÇÃO	b (cm)	20
	h (cm)	37,5
	M_{yd} (kNm)	39,96

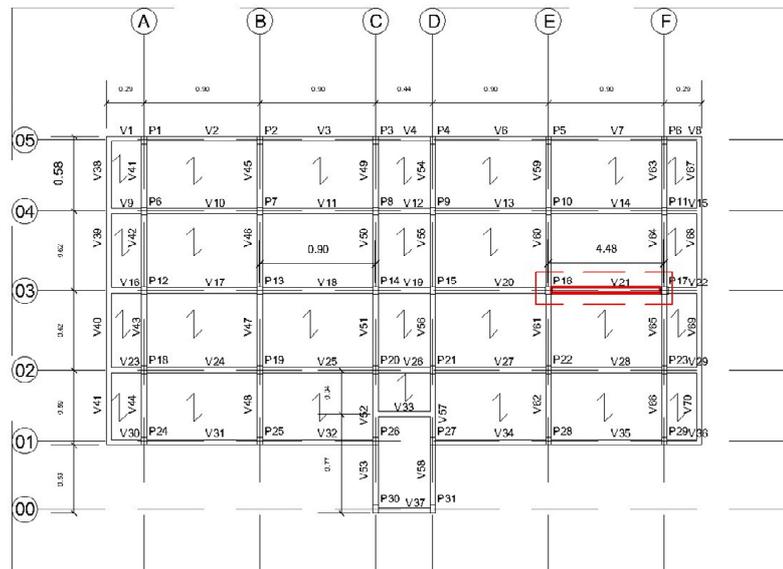
ELEMENTO	V18		
ESFORÇOS DE CÁLCULO	V_d (kN)	45,17	
	N_d (kN)	53,95	
INÉRCIA DO ELEMENTO	I_x (cm ⁴)	87.890,63	
	I_y (cm ⁴)	25.000,00	
ESBELTEZ	λ_x	41,38	OK
	λ_y	77,60	OK
ESBELTEZ RELATIVA	$\lambda_{rel,x}$	0,69	VERIFICAÇÕES EXTRAS
	$\lambda_{rel,y}$	1,29	VERIFICAÇÕES EXTRAS
ESTABILIDADE LATERAL DAS VIGAS	h/b	1,875	OK
	BM	8,37	
	L1/b	22,4	
	$E0,ef/(BM*fm,d)$	61,33	
TRAÇÃO	$ft0,d$ (MPa)	5,86	CAPACIDADE SOLICITADA
	QN,td (MPa)	0,72	12,27%
COMPRESSÃO	$fc0,d$ (MPa)	8,14	CAPACIDADE SOLICITADA
	QN,td (MPa)	NÃO HÁ	0,00%
FLEXÃO RETA	fm,d (MPa)	9,77	CAPACIDADE SOLICITADA
	W (m ³)	4,69E-03	
	Qm,d (MPa)	8,53	87,25%
FLEXOTRAÇÃO	$QN,td / ft0,d$	0,12	CAPACIDADE SOLICITADA
	$Qm,d / fm,d$	0,87	
	VERIFICAÇÃO	0,995	99,52%
FLEXOCOMPRESSÃO	$QN,cd / fc0,d$	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	$Qm,d / fm,d$	0,87	
	VERIFICAÇÃO	NÃO HÁ	87,25%
VERIFICAÇÕES DE ESBELTEZ RELATIVA	kcx	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	kcy	NÃO HÁ	
	VERIFICAÇÃO 1	NÃO HÁ	87,25%
	VERIFICAÇÃO 2	NÃO HÁ	87,25%
CISALHAMENTO LONGITUDINAL	$fv0,d$	1,01	CAPACIDADE SOLICITADA
	Td	0,90	
	VERIFICAÇÃO	0,89	89,16%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

6.1.2. Viga crítica a esforço normal

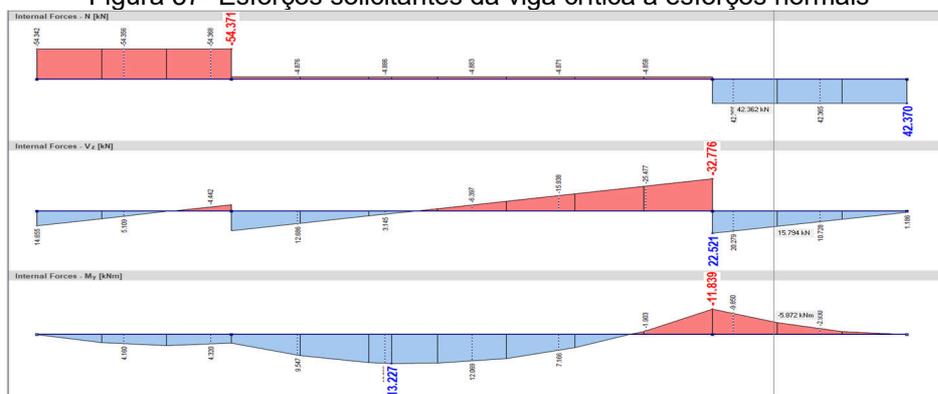
Na análise computacional, a viga identificada como V21, que é destacada na Figura 56, apresenta os maiores esforços normais. Esta viga está submetida a um esforço de compressão de cálculo de 54,374 kN e uma tração de cálculo de 42,37 kN. Adicionalmente, ela sofre um momento fletor de cálculo de 13,233 kNm e um esforço cortante de 32,776 kN, conforme ilustrado na Figura 57. A viga tem um comprimento de 4,48 metros, e os esforços são resultado do estado de limite último, com o vento a 90° servindo como carga principal e a sobrecarga como carga secundária.

Figura 56 - Viga crítica a esforços normais



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 57- Esforços solicitantes da viga crítica a esforços normais



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

6.1.2.1. Verificações de estabilidade – viga crítica à esforço normal

Nas verificações de estabilidade serão analisados a esbeltez, a esbeltez relativa e a estabilidade lateral da viga.

- Esbeltez

A viga possui dimensões de 20 x 37,5 cm e 4,48 metros, com a inércia da viga descrita na Tabela 2, pela Equação 17 temos que a esbeltez da viga na direção X é de 41,38 e na direção Y 77,60.

$$\lambda_x = \frac{4,48}{\sqrt{\frac{87890,63}{750}}} = 41,38$$

$$\lambda_y = \frac{4,48}{\sqrt{\frac{25000}{750}}} = 77,60$$

Portanto, como as esbeltezes foram menores que 140, a viga passa na verificação de esbeltez.

- Esbeltez relativa

A esbeltez relativa leva em consideração, além das dimensões da viga, o valor de resistência à compressão característica da madeira, valor descrito na Tabela 1, logo, pelas Equações 19 e 20, o valor da esbeltez relativa em X é de 0,69 e em Y é de 1,29.

$$\lambda_x = \frac{44,34}{\pi} \sqrt{\frac{25}{9200}} = 0,69$$

$$\lambda_y = \frac{77,60}{\pi} \sqrt{\frac{25}{9200}} = 1,29$$

Com esses valores é necessário é necessário verificar as condições adicionais para as verificações de compressão e flexo-compressão, tais verificações adicionais são descritas nas Equações 21 e 22.

Para verificar as Equações ditas no parágrafo anterior, antes é necessário encontrar o K_{cx} e K_{cy} , os quais dependem dos coeficientes K_x e K_y , dessa forma aplicando as Equações 25 e 26, obteve-se que $k_x = 0,93$ e $k_y = 1,82$.

$$K_x = 0,5 \left[1 + (0,69 - 0,3) + (0,69)^2 \right] = 0,93$$

$$K_y = 0,5 \left[1 + (1,29 - 0,3) + (1,29)^2 \right] = 1,82$$

Com os valores de k_x e k_y utiliza-se as Equações 23 e 24, assim obteve-se para $K_{cx} = 0,64$ e para $k_{cy} = 0,32$

$$K_{cx} = \frac{1}{0,93 + \sqrt{0,93 - (0,69)^2}} = 0,64$$

$$K_{cy} = \frac{1}{1,82 + \sqrt{1,82 - (1,29)^2}} = 0,32$$

As verificações das Equações 21 e 22 são demonstradas após os as verificações de compressão e flexocompressão.

- Estabilidade lateral da viga

Para a estabilidade lateral das vigas, precisa-se do módulo de elasticidade específico e da resistência à flexão de cálculo da madeira, ambos mostrados na Tabela 16, além disso, utiliza-se coeficiente de correção que retirado da Figura 47, nesse caso com valor igual a 8,37.

Com isso, ao utilizar a Equação 27 teve-se como resultado: $22,4 < 61,33$. Logo, a inequação é verdadeira e a viga é dita com estabilidade lateral.

$$\frac{4,48}{0,20} \leq \frac{5016}{8,37 \cdot 9,77} = 22,4 \leq 61,33$$

6.1.2.2. Verificações de solicitações normais - viga crítica à esforço normal

Nas verificações de estabilidade serão analisados a tração, compressão, flexotração, flexocompressão e verificações devido a esbeltez.

- Tração

A viga sofre com esforço de tração de cálculo de 42,370 kN. Aplicando-se a Equação 9 temos que: $0,56 \text{ MPa} < 5,86 \text{ MPa}$. Logo, como a inequação é verdadeira a viga passa para solicitação de tração com sua capacidade de solicitação igual a 9,64%.

$$\frac{42,37}{750} \cdot 10 \leq 5,86 = 0,56 \leq 5,86$$

- Compressão

A viga sofre com esforço de compressão de cálculo de 54,374 kN. Aplicando-se a Equação 10 temos que: $0,72 \text{ MPa} < 8,14 \text{ MPa}$. Logo, como a inequação é verdadeira a viga passa para solicitação de compressão com sua capacidade de solicitação igual a 8,90%.

$$\frac{54,37}{750} \cdot 10 \leq 8,14 = 0,72 \leq 8,14$$

- Flexão reta

A viga é solicitada a um momento fletor de cálculo de 13,227 kNm. Dessa forma, aplicando-se a Equação 11 temos que: $0,29 < 1$. Logo, como a inequação é verdadeira a viga passa na solicitação de flexão com sua capacidade de solicitação igual a 28,88%.

$$\frac{13,23}{\frac{4,69 \cdot 10^{-3}}{9,77 \cdot 10^3}} \leq 1 = 0,29 \leq 1$$

- Flexotração

A viga só possui esforços de momentos M_y , assim dispensa-se a utilização da Equação 12 para verificação de flexotração.

Com isso, resta fazer a verificação da Equação 13, a qual obtém-se que: $0,39 < 1$. Logo, como a inequação é verdadeira, a viga passa nas solicitações de flexotração com sua capacidade de solicitação igual a 38,51 %.

$$\frac{0,56}{5,86} + 0 + \frac{2,82}{9,77} \leq 1 = 0,10 + 0 + 0,29 \leq 1 = 0,39 \leq 1$$

- Flexocompressão

A viga só possui esforços de momentos M_y , assim dispensa-se a utilização da Equação 14 para verificação de flexocompressão.

Com isso, resta fazer a verificação da Equação 15, a qual obtém-se que: $0,30 < 1$. Logo, como a inequação é verdadeira, a viga passa nas solicitações de flexocompressão com sua capacidade de solicitação igual a 28,88%.

$$\left(\frac{0,72}{8,14}\right)^2 + 0 + \frac{2,82}{9,77} \leq 1 = 0,01 + 0 + 0,29 \leq 1 = 0,30 \leq 1$$

- VERIFICAÇÕES ADICIONAIS DEVIDO A ESBELTEZ

Para a verificação adicionais devido a esbeltez, utiliza os critérios de cálculo das Equações 21 e 22.

Dessa forma, com os valores de K_{cx} e K_{cy} encontrados, obteve-se que o pior caso foi pra verificação da Equação 25, em que o resultado foi $0,57 < 1$, logo como a inequação é verdadeira, a viga é passa nas verificações adicionais devido a ebeltez com sua capacidade de solitação igual a 56,59%.

$$\frac{0,72}{0,64 \cdot 8,14} + 0 + 0,7 \frac{2,82}{9,77} \leq 1 = 0,14 + 0 + 0,20 \leq 1 = 0,34 \leq 1$$

$$\frac{0,72}{0,32 \cdot 8,14} + 0 + \frac{2,82}{9,77} \leq 1 = 0,28 + 0 + 0,20 \leq 1 = 0,48 \leq 1$$

6.1.2.3.Verificação de cisalhamento - viga crítica à esforço normal

A viga é solicitada a um esforço cortante de cálculo 32,776 kN. Com isso, ao aplicar a Equação 16, temos como resultado que: 0,66 MPa < 1,01 MPa.

$$1,5 \cdot \frac{32,78}{750} \cdot 10 \leq 1,01 = 0,66 \leq 1,01$$

Portanto, como a inequação é verdadeira a viga passa na solitação de cisalhamento longitudinal com sua capacidade de aproveitamento em 64,69 %.

6.1.2.4.Resumo de cálculo - viga crítica à esforço normal

A Tabela 19 e 20 sintetiza os valores discutidos para a viga estudada, percebe-se que ela passou em todas verificações e dessa forma, pode-se dizer que a viga é segura para a construção do edifício.

Tabela 19 - Verificações viga V21 à compressão

ELEMENTO	V21 - VERIFICAÇÃO À COMPRESSÃO		
COMPRIENTO DO ELEMENTO (m)	4,48		
SEÇÃO	b (cm)	20	
	h (cm)	37,5	
ESFORÇOS DE CÁLCULO	M_{yd} (kNm)	13,23	
	V_d (kN)	32,78	
	N_d (kN)	-54,37	
INÉRCIA DO ELEMENTO	I_x (cm ⁴)	87.890,63	
	I_y (cm ⁴)	25.000,00	
ESBELTEZ	λ_x	41,38	OK
	λ_y	77,60	OK
ESBELTEZ RELATIVA	$\lambda_{rel,x}$	0,69	VERIFICAÇÕES EXTRAS
	$\lambda_{rel,y}$	1,29	VERIFICAÇÕES EXTRAS
ESTABILIDADE LATERAL DAS VIGAS	h/b	1,875	OK
	BM	8,37	
	L1/b	22,4	
	$E0,ef/(BM*fm,d)$	61,33	
TRAÇÃO	$ft0,d$ (MPa)	5,86	CAPACIDADE SOLICITADA
	QN,td (MPa)	NÃO HÁ	0,00%
COMPRESSÃO	$fc0,d$ (MPa)	8,14	CAPACIDADE SOLICITADA
	QN,td (MPa)	0,72	8,90%
FLEXÃO RETA	fm,d (MPa)	9,77	CAPACIDADE SOLICITADA
	W (m ³)	4,69E-03	
	Qm,d (MPa)	2,82	28,88%
FLEXOTRAÇÃO	QN,td / $ft0,d$	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	Qm,d / fm,d	0,29	
	VERIFICAÇÃO	NÃO HÁ	28,88%
FLEXOCOMPRESSÃO	QN,cd / $fc0,d$	0,09	CAPACIDADE SOLICITADA
	Qm,d / fm,d	0,29	
	VERIFICAÇÃO	0,30	29,67%
VERIFICAÇÕES DE ESBELTEZ RELATIVA	kcx	0,64	CAPACIDADE SOLICITADA
	kcy	0,32	
	VERIFICAÇÃO 1	0,34	34,06%
	VERIFICAÇÃO 2	0,57	56,59%
CISALHAMENTO LONGITUDINAL	$fv0,d$	1,01	CAPACIDADE SOLICITADA
	Td	0,66	
	VERIFICAÇÃO	0,65	64,69%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 20 - Verificações viga V21 à tração

ELEMENTO	V21 - VERIFICAÇÃO À TRAÇÃO		
COMPRIENTO DO ELEMENTO (m)	4,48		
SEÇÃO	b (cm)	20	
	h (cm)	37,5	
ESFORÇOS DE CÁLCULO	M_{yd} (kNm)	13,23	
	V_d (kN)	32,78	
	N_d (kN)	42,37	
INÉRCIA DO ELEMENTO	I_x (cm ⁴)	87.890,63	
	I_y (cm ⁴)	25.000,00	
ESBELTEZ	λ_x	41,38	OK
	λ_y	77,60	OK
ESBELTEZ RELATIVA	$\lambda_{rel,x}$	0,69	VERIFICAÇÕES EXTRAS
	$\lambda_{rel,y}$	1,29	VERIFICAÇÕES EXTRAS
ESTABILIDADE LATERAL DAS VIGAS	h/b	1,875	OK
	BM	8,37	
	L1/b	22,4	
	$E0,ef/(BM^*fm,d)$	61,33	
TRAÇÃO	$ft0,d$ (MPa)	5,86	CAPACIDADE SOLICITADA
	QN,td (MPa)	0,56	9,64%
COMPRESSÃO	$fc0,d$ (MPa)	8,14	CAPACIDADE SOLICITADA
	QN,td (MPa)	NÃO HÁ	0,00%
FLEXÃO RETA	fm,d (MPa)	9,77	CAPACIDADE SOLICITADA
	W (m ³)	4,69E-03	
	Qm,d (MPa)	2,82	28,88%
FLEXOTRAÇÃO	QN,td / $ft0,d$	0,10	CAPACIDADE SOLICITADA
	Qm,d / fm,d	0,29	
	VERIFICAÇÃO	0,385	38,51%
FLEXOCOMPRESSÃO	QN,cd / $fc0,d$	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	Qm,d / fm,d	0,29	
	VERIFICAÇÃO	NÃO HÁ	28,88%
VERIFICAÇÕES DE ESBELTEZ RELATIVA	kc _x	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	kc _y	NÃO HÁ	
	VERIFICAÇÃO 1	NÃO HÁ	28,88%
	VERIFICAÇÃO 2	NÃO HÁ	28,88%
CISALHAMENTO LONGITUDINAL	$fv0,d$	1,01	CAPACIDADE SOLICITADA
	T _d	0,66	
	VERIFICAÇÃO	0,65	64,69%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

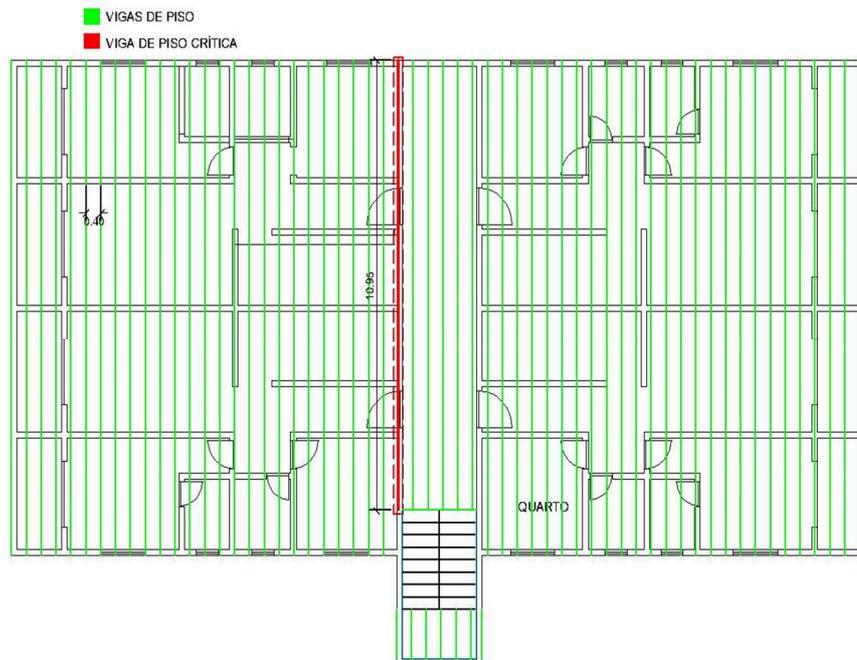
6.2. Vigas secundárias

As vigas secundárias não foram incluídas na modelagem da estrutura principal, o que torna necessário o levantamento das cargas nas vigas de piso de cada pavimento para determinar a viga crítica. As vigas de piso são solicitadas pela sobrecarga de utilização, pelo peso do próprio piso e, em alguns casos, pelo peso das paredes.

Essas vigas estão espaçadas entre si por 40 cm, e as peças para as vigas de piso foram dimensionadas com comprimento de 3,30 metros nos pavimentos tipo, para cobrir o maior vão entre as vigas principais. No pavimento dos reservatórios, as vigas possuem 2,4 metros de comprimento.

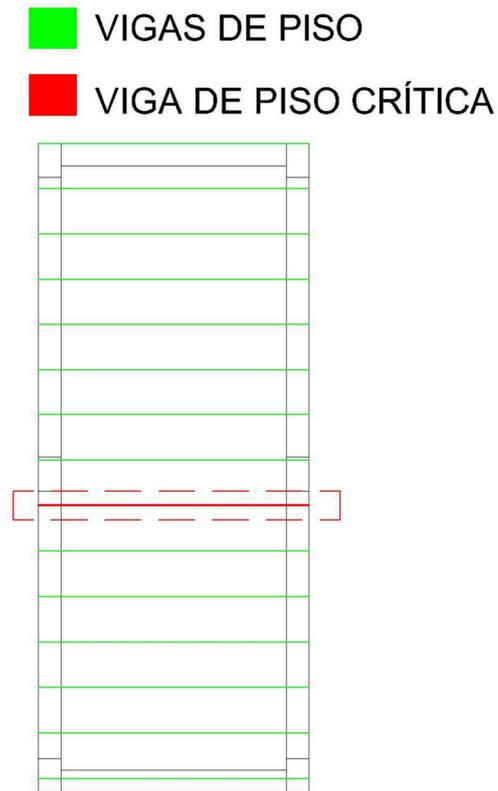
As vigas de piso que foram objeto de estudo detalhado incluem a viga de piso crítica para o pavimento tipo, que está ilustrada na Figura 58, e a viga de piso crítica para o pavimento do reservatório, mostrada na Figura 59

Figura 58- Viga de piso crítica do pavimento tipo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 59- Viga de piso crítica do reservatório



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

6.2.1. Viga secundária crítica do pavimento tipo

A viga secundária crítica no pavimento tipo tem cargas lineares descritas pela Tabela 21.

Tabela 21 - Cargas lineares distribuídas na viga de piso crítica do pavimento tipo

CARGA LINEAR NA VIGA DE PISO CRÍTICA PARA O PAVIMENTO TIPO	
AÇÃO	CARGA (kN/m)
Sobrecarga de utilização	1,00
Peso do piso	0,68
Peso da parede	4,50

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Utilizando as cargas mencionadas e as combinações já discutidas anteriormente, foi determinado que a viga de piso do pavimento tipo está sujeita a um

momento fletor máximo de cálculo de 9,46 kNm e um esforço cortante máximo de cálculo de 12,21 kN.

6.2.1.1. Verificações de estabilidade – viga crítica secundária do pavimento tipo

Nas verificações de estabilidade serão analisados a esbeltez e a estabilidade lateral da viga.

- Esbeltez

A viga possui dimensões de 11,5 x 22,5 cm e 3,10 metros, com a inércia da viga descrita na Tabela 2, pela Equação 17 temos que a esbeltez da viga na direção X é de 47,73 e na direção Y 93,38.

$$\lambda_x = \frac{3,10}{\sqrt{\frac{10916,02}{258,75}}} = 47,73$$

$$\lambda_y = \frac{3,10}{\sqrt{\frac{2851,64}{258,75}}} = 93,38$$

Portanto, como as esbeltezes foram menores que 140, a viga passa na verificação de esbeltez.

- Estabilidade lateral da viga

Para a estabilidade lateral das vigas, precisa-se do módulo de elasticidade específico e da resistência à flexão de cálculo da madeira, ambos mostrados na Tabela 16, além disso, utiliza-se coeficiente de correção que retirado da Figura 47, nesse caso com valor igual a 8,64.

Com isso, ao utilizar a Equação 27 teve-se como resultado: $26,96 < 59,39$. Logo, a inequação é verdadeira e a viga é dita com estabilidade lateral.

$$\frac{3,10}{0,115} \leq \frac{5016}{8,64 \cdot 9,77} = 26,96 \leq 59,39$$

6.2.1.2.Verificações de solicitações normais - viga crítica secundária do pavimento tipo

Nas verificações de estabilidade será analisado apenas a flexão reta.

- Flexão reta

A viga é solicitada a um momento fletor de cálculo de 9,46 kNm. Dessa forma, aplicando-se a Equação 11 temos que: $0,998 < 1$. Logo, como a inequação é verdadeira a viga passa na solicitação de flexão com sua capacidade de solicitação igual a 99,77%.

$$\frac{9,46}{\frac{9,70 \cdot 10^{-4}}{9,77 \cdot 10^3}} \leq 1 = 0,998 \leq 1$$

6.2.1.3.Verificação de cisalhamento - viga crítica secundária do pavimento tipo

A viga é solicitada a um esforço cortante de cálculo 12,21 kN. Com isso, ao aplicar a Equação 16, temos como resultado que: $0,71 \text{ MPa} < 1,01 \text{ MPa}$.

$$1,5 \cdot \frac{32,78}{750} \cdot 10 \leq 1,01 = 0,71 \leq 1,01$$

Portanto, como a inequação é verdadeira a viga passa na solicitação de cisalhamento longitudinal com sua capacidade de aproveitamento em 69,85 %.

6.2.1.4.Resumo de cálculo - viga crítica secundária do pavimento tipo

A Tabela 22 sintetiza os valores discutidos para a viga estudada, percebe-se que ela passou em todas verificações e dessa forma, pode-se dizer que a viga é segura para a construção do edifício.

Tabela 22- Verificações viga crítica de piso do pavimento tipo

ELEMENTO	VIGA DE PISO CRÍTICA PAVIMENTO TIPO		
COMPRIMENTO DO ELEMENTO (m)	3,1		
SEÇÃO	b (cm)	11,5	
	h (cm)	22,5	
ESFORÇOS DE CÁLCULO	M_{yd} (kNm)	9,46	
	V_d (kN)	12,21	
	N_d (kN)	0,00	
INÉRCIA DO ELEMENTO	I_x (cm ⁴)	10.916,02	
	I_y (cm ⁴)	2.851,64	
ESBELTEZ	λ_x	47,73	OK
	λ_y	93,38	OK
ESBELTEZ RELATIVA	$\lambda_{rel,x}$	0,79	VERIFICAÇÕES EXTRAS
	$\lambda_{rel,y}$	1,55	VERIFICAÇÕES EXTRAS
ESTABILIDADE LATERAL DAS VIGAS	h/b	1,956521739	OK
	BM	8,64	
	L1/b	26,95652174	
	$E0,ef/(BM*fm,d)$	59,39	
TRAÇÃO	$ft0,d$ (MPa)	5,86	CAPACIDADE SOLICITADA
	QN,td (MPa)	NÃO HÁ	0,00%
COMPRESSÃO	$fc0,d$ (MPa)	8,14	CAPACIDADE SOLICITADA
	QN,td (MPa)	NÃO HÁ	0,00%
FLEXÃO RETA	fm,d (MPa)	9,77	CAPACIDADE SOLICITADA
	W (m ³)	9,70E-04	
	Qm,d (MPa)	9,75	99,77%
FLEXOTRAÇÃO	QN,td / $ft0,d$	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	Qm,d / fm,d	1,00	
	VERIFICAÇÃO	NÃO HÁ	99,77%
FLEXOCOMPRESSÃO	QN,cd / $fc0,d$	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	Qm,d / fm,d	1,00	
	VERIFICAÇÃO	NÃO HÁ	99,77%
VERIFICAÇÕES DE ESBELTEZ RELATIVA	kc _x	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	kc _y	NÃO HÁ	
	VERIFICAÇÃO 1	NÃO HÁ	99,77%
	VERIFICAÇÃO 2	NÃO HÁ	99,77%
CISALHAMENTO LONGITUDINAL	$fv0,d$	1,01	CAPACIDADE SOLICITADA
	T _d	0,71	
	VERIFICAÇÃO	0,70	69,85%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

6.2.2. Viga secundária crítica do reservatório

A viga secundária crítica localizada no reservatório tem suas cargas lineares detalhadamente descritas na Tabela 23.

Tabela 23 - Cargas lineares distribuídas na viga crítica de piso do reservatório

CARGA LINEAR NA VIGA DE PISO CRÍTICA PARA O RESERVATÓRIO	
AÇÃO	CARGA (kN/m)
Sobrecarga de utilização	0,40
Peso do piso	0,68
Peso dos reservatórios	1,78

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Com essas cargas e utilizando as mesmas combinações já discutidas, obteve-se que a viga de piso do reservatório possui um momento fletor máximo de cálculo de 3,22 kNm e um esforço cortante máximo de cálculo de 5,37 kN.

6.2.2.1. Verificações de estabilidade – viga crítica secundária do reservatório

Nas verificações de estabilidade serão analisados a esbeltez e a estabilidade lateral da viga.

- Esbeltez

A viga possui dimensões de 11,5 x 22,5 cm e 2,40 metros, com a inércia da viga descrita na Tabela 2, pela Equação 17 temos que a esbeltez da viga na direção X é de 36,95 e na direção Y 72,29.

$$\lambda_x = \frac{2,40}{\sqrt{\frac{10916,02}{258,75}}} = 36,95$$

$$\lambda_y = \frac{2,40}{\sqrt{\frac{2851,64}{258,75}}} = 72,29$$

Portanto, como as esbeltezes foram menores que 140, a viga passa na verificação de esbeltez.

- Estabilidade lateral da viga

Para a estabilidade lateral das vigas, precisa-se do módulo de elasticidade específico e da resistência à flexão de cálculo da madeira, ambos mostrados na Tabela 16, além disso, utiliza-se coeficiente de correção que retirado da Figura 47, nesse caso com valor igual a 8,64.

Com isso, ao utilizar a Equação 27 teve-se como resultado: $20,9 < 59,39$. Logo, a inequação é verdadeira e a viga é dita com estabilidade lateral.

$$\frac{2,40}{0,115} \leq \frac{5016}{8,64 \cdot 9,77} = 20,9 \leq 59,39$$

6.2.2.2. Verificações de solicitações normais - viga crítica secundária do reservatório

Nas verificações de estabilidade será analisado apenas a flexão reta.

- Flexão reta

A viga é solicitada a um momento fletor de cálculo de 3,22 kNm. Dessa forma, aplicando-se a Equação 11 temos que: $0,34 < 1$. Logo, como a inequação é verdadeira a viga passa na solicitação de flexão com sua capacidade de solicitação igual a 33,96 %.

$$\frac{3,22}{9,70 \cdot 10^{-4}} \leq 1 = 0,34 \leq 1$$

6.2.2.3. Verificação de cisalhamento - viga crítica secundária do reservatório

A viga é solicitada a um esforço cortante de cálculo 5,37 kN. Com isso, ao aplicar a Equação 16, temos como resultado que: 0,31 MPa < 1,01 MPa.

$$1,5 \cdot \frac{32,78}{258,75} \cdot 10 \leq 1,01 = 0,31 \leq 1,01$$

Portanto, como a inequação é verdadeira a viga passa na solicitação de cisalhamento longitudinal com sua capacidade de aproveitamento em 30,72 %.

6.2.2.4. Resumo de cálculo - viga crítica secundária do reservatório

A Tabela 24 sintetiza os valores discutidos para a viga estudada, percebe-se que ela passou em todas as verificações, e dessa forma pode-se dizer que a viga é segura para a construção do edifício.

Tabela 24 - Verificações viga crítica de piso do reservatório

ELEMENTO	VIGA DE PISO CRÍTICA DO RESERVATÓRIO		
COMPRIMENTO DO ELEMENTO (m)	2,4		
SEÇÃO	b (cm)	11,5	
	h (cm)	22,5	
ESFORÇOS DE CÁLCULO	M_{yd} (kNm)	3,22	
	V_d (kN)	5,37	
	N_d (kN)	0,00	
INÉRCIA DO ELEMENTO	I_x (cm ⁴)	10.916,02	
	I_y (cm ⁴)	2.851,64	
ESBELTEZ	λ_x	36,95	OK
	λ_y	72,29	OK
ESBELTEZ RELATIVA	$\lambda_{rel,x}$	0,61	VERIFICAÇÕES EXTRAS
	$\lambda_{rel,y}$	1,20	VERIFICAÇÕES EXTRAS
ESTABILIDADE LATERAL DAS VIGAS	h/b	1,956521739	OK
	BM	8,64	
	L1/b	20,86956522	
	$E0,ef/(BM*fm,d)$	59,39	

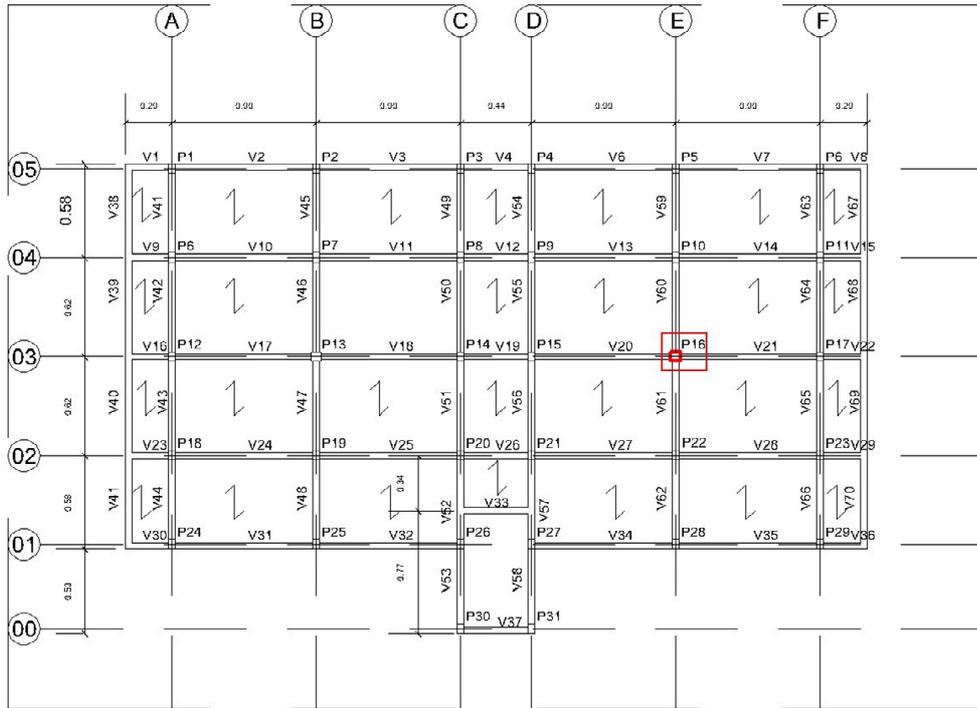
ELEMENTO	VIGA DE PISO CRÍTICA DO RESERVATÓRIO		
TRAÇÃO	ft0,d (MPa)	5,86	CAPACIDADE SOLICITADA
	QN,td (MPa)	NÃO HÁ	0,00%
COMPRESSÃO	fc0,d (MPa)	8,14	CAPACIDADE SOLICITADA
	QN,td (MPa)	NÃO HÁ	0,00%
FLEXÃO RETA	fm,d (MPa)	9,77	CAPACIDADE SOLICITADA
	W (m ³)	9,70E-04	CAPACIDADE SOLICITADA
	Qm,d (MPa)	3,32	33,96%
FLEXOTRAÇÃO	QN,td / ft0,d	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	Qm,d / fm,d	0,34	CAPACIDADE SOLICITADA
	VERIFICAÇÃO	NÃO HÁ	33,96%
FLEXOCOMPRESSÃO	QN,cd / fc0,d	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	Qm,d / fm,d	0,34	CAPACIDADE SOLICITADA
	VERIFICAÇÃO	NÃO HÁ	33,96%
VERIFICAÇÕES DE ESBELTEZ RELATIVA	kc _x	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	kc _y	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	VERIFICAÇÃO 1	NÃO HÁ	33,96%
	VERIFICAÇÃO 2	NÃO HÁ	33,96%
CISALHAMENTO LONGITUDINAL	fv0,d	1,01	CAPACIDADE SOLICITADA
	Td	0,31	CAPACIDADE SOLICITADA
	VERIFICAÇÃO	0,31	30,72%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

6.3. Pilares

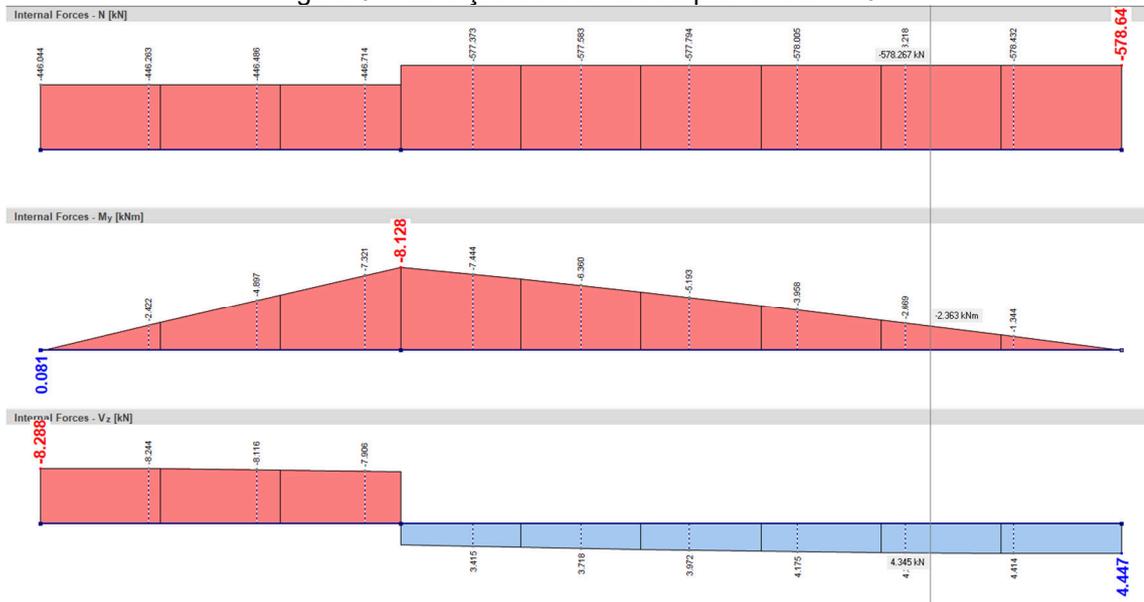
Os pilares são submetidos primordialmente a esforços normais, e a verificação do pilar crítico focou no pilar que está sob maior compressão. O pilar identificado como crítico é o P16, conforme mostrado na Figura 60. Este pilar está sujeito a uma compressão de cálculo de 578,64 kN, um momento fletor máximo de 8,128 kNm, e um esforço cortante máximo de 8,288 kN, detalhados na Figura 61. A análise foi realizada considerando a combinação de Estado Limite Último (ELU) com a sobrecarga atuando como carga principal e o vento a 90° como carga secundária.

Figura 60- Pilar crítico p16



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 61- Esforços solicitantes do pilar crítico P16



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

6.3.1. Verificações de estabilidade – pilar crítico

Nas verificações de estabilidade serão analisados a esbeltez e a esbeltez relativa.

- Esbeltez

O pilar possui dimensões de 35 x 35 cm e 3,00 metros de comprimento destravado, com a inércia do pilar descrita na Tabela 2, pela Equação 17 temos que a esbeltez do pilar na direção X é de 25,69 e na direção Y 29,69.

$$\lambda_x = \frac{3,00}{\sqrt{\frac{125052,08}{1225}}} = 25,69$$

$$\lambda_y = \frac{3,00}{\sqrt{\frac{125052,08}{1225}}} = 25,69$$

Portanto, como as esbeltezes foram menores que 140, o pilar passa na verificação de esbeltez.

- Esbeltez relativa

A esbeltez relativa leva em consideração, além das dimensões do pilar, o valor de resistência à compressão característica da madeira, valor descrito na Tabela 1, logo, pelas Equações 19 e 20, o valor da esbeltez relativa em X é de 0,49 e em Y é de 0,49.

$$\lambda_x = \frac{29,69}{\pi} \sqrt{\frac{25}{9200}} = 0,49$$

$$\lambda_y = \frac{29,69}{\pi} \sqrt{\frac{25}{9200}} = 0,49$$

Com esses valores é necessário é necessário verificar as condições adicionais para as verificações de compressão e flexo-compressão, tais verificações adicionais são descritas nas Equações 21 e 22.

Para verificar as Equações ditas no parágrafo anterior, antes é necessário encontrar o K_{cx} e K_{cy} , os quais dependem dos coeficientes K_x e K_y , dessa forma aplicando as Equações 25 e 26, obteve-se que $k_x = 0,72$ e $k_y = 0,72$.

$$K_x = 0,5 \left[1 + (0,49 - 0,3) + (0,49)^2 \right] = 0,72$$

$$K_y = 0,5 \left[1 + (0,49 - 0,3) + (0,49)^2 \right] = 0,72$$

Com os valores de k_x e k_y utiliza-se as Equações 23 e 24, assim obteve-se para $K_{cx} = 0,81$ e para $k_{cy} = 0,81$.

$$K_{cx} = \frac{1}{0,72 + \sqrt{0,72 - (0,49)^2}} = 0,81$$

$$K_{cy} = \frac{1}{0,72 + \sqrt{0,72 - (0,49)^2}} = 0,81$$

As verificações das Equações 21 e 22 são demonstradas após os as verificações de compressão e flexo-compressão.

6.3.2. Verificações de solicitações normais – pilar crítico

Nas verificações de estabilidade serão analisados a tração, compressão, flexo-tração, flexo-compressão e verificações devido a esbeltez.

- Tração

O pilar não está sujeito a esforços solicitantes de tração.

- Compressão

O pilar sofre com esforço de compressão de cálculo de 578,64 kN. Aplicando-se a Equação 10 temos que: 4,72 MPa < 8,14 MPa. Logo, como a inequação é verdadeira o pilar passa para solicitação de compressão com sua capacidade de solicitação igual a 58,01%.

$$\frac{578,64}{1225} \cdot 10 \leq 8,14 = 4,72 \leq 8,14$$

- Flexão reta

O pilar é solicitado a um momento fletor de cálculo de 8,128 kNm. Dessa forma, aplicando-se a Equação 11 temos que: 0,12 < 1. Logo, como a inequação é verdadeira o pilar passa na solicitação de flexão com sua capacidade de solicitação igual a 11,64%.

$$\frac{8,13}{\frac{7,15 \cdot 10^{-3}}{9,77 \cdot 10^3}} \leq 1 = 0,12 \leq 1$$

- Flexotração

O pilar não sofre com esforços de tração

- Flexocompressão

O pilar só possui esforços de momentos M_y , assim dispensa-se a utilização da Equação 14 para verificação de flexocompressão.

Com isso, resta fazer a verificação da Equação 15, a qual obtém-se que: $0,45 < 1$. Logo, como a inequação é verdadeira, o pilar passa nas solicitações de flexocompressão com sua capacidade de solicitação igual a 45,29%.

$$\left(\frac{4,72}{8,14}\right)^2 + 0 + \frac{1,14}{9,77} \leq 1 = 0,33 + 0 + 0,12 \leq 1 = 0,45 \leq 1$$

- Verificações adicionais devido a esbeltez

Para a verificação adicionais devido a esbeltez, utiliza os critérios de cálculo das Equações 21 e 22.

Dessa forma, com os valores de K_{cx} e K_{cy} encontrados, obteve-se que o pior caso foi pra verificação da Equação 25, em que o resultado foi $0,84 < 1$, logo como a inequação é verdadeira, o pilar passa nas verificações adicionais devido a esbeltez com sua capacidade de solicitação igual a 83,55%

$$\frac{4,72}{0,81 \cdot 8,14} + 0 + 0,7 \frac{1,14}{9,77} \leq 1 = 0,72 + 0 + 0,08 \leq 1 = 0,80 \leq 1$$

$$\frac{0,72}{0,32 \cdot 8,14} + 0 + \frac{2,82}{9,77} \leq 1 = 0,72 + 0 + 0,12 \leq 1 = 0,84 \leq 1$$

6.3.3. Verificação de cisalhamento – pilar crítico

O pilar é solicitado a um esforço cortante de cálculo 8,288 kN. Com isso, ao aplicar a Equação 16, temos como resultado que: $0,10 \text{ MPa} < 1,01 \text{ MPa}$.

$$1,5 \cdot \frac{8,23}{1225} \cdot 10 \leq 1,01 = 0,66 \leq 1,01$$

Portanto, como a inequação é verdadeira o pilar passa na solicitação de cisalhamento longitudinal com sua capacidade de aproveitamento em 10,02 %.

6.3.4. Resumo de cálculo – pilar crítico

A Tabela 25 sintetiza os valores discutidos para o pilar estudada, percebe-se que ele passou em todas verificações e dessa forma, pode-se dizer que o pilar é segura para a construção do edifício.

Tabela 25 - Verificações do pilar P16

ELEMENTO	P16		
COMPRIMENTO DO ELEMENTO (m)	3		
SEÇÃO	b (cm)	35	
	h (cm)	35	
ESFORÇOS DE CÁLCULO	M_{yd} (kNm)	8,13	
	V_d (kN)	8,29	
	N_d (kN)	-578,64	
INÉRCIA DO ELEMENTO	I_x (cm ⁴)	125.052,08	
	I_y (cm ⁴)	125.052,08	
ESBELTEZ	λ_x	29,69	OK
	λ_y	29,69	OK
ESBELTEZ RELATIVA	$\lambda_{rel,x}$	0,49	VERIFICAÇÕES EXTRAS
	$\lambda_{rel,y}$	0,49	VERIFICAÇÕES EXTRAS
ESTABILIDADE LATERAL DAS VIGAS	h/b	1	OK
	BM	5,98	
	L1/b	8,571428571	
	$E0,ef/(BM*fm,d)$	85,83	
TRAÇÃO	$ft_{0,d}$ (MPa)	5,86	CAPACIDADE SOLICITADA
	$Q_{N,td}$ (MPa)	NÃO HÁ	0,00%
COMPRESSÃO	$fc_{0,d}$ (MPa)	8,14	CAPACIDADE SOLICITADA
	$Q_{N,td}$ (MPa)	4,72	58,01%
FLEXÃO RETA	fm,d (MPa)	9,77	CAPACIDADE SOLICITADA
	W (m ³)	7,15E-03	
	$Q_{m,d}$ (MPa)	1,14	11,64%
FLEXOTRAÇÃO	$Q_{N,td} / ft_{0,d}$	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	$Q_{m,d} / fm,d$	0,12	
	VERIFICAÇÃO	NÃO HÁ	11,64%
FLEXOCOMPRESSÃO	$Q_{N,cd} / fc_{0,d}$	0,58	CAPACIDADE SOLICITADA
	$Q_{m,d} / fm,d$	0,12	
	VERIFICAÇÃO	0,45	45,29%

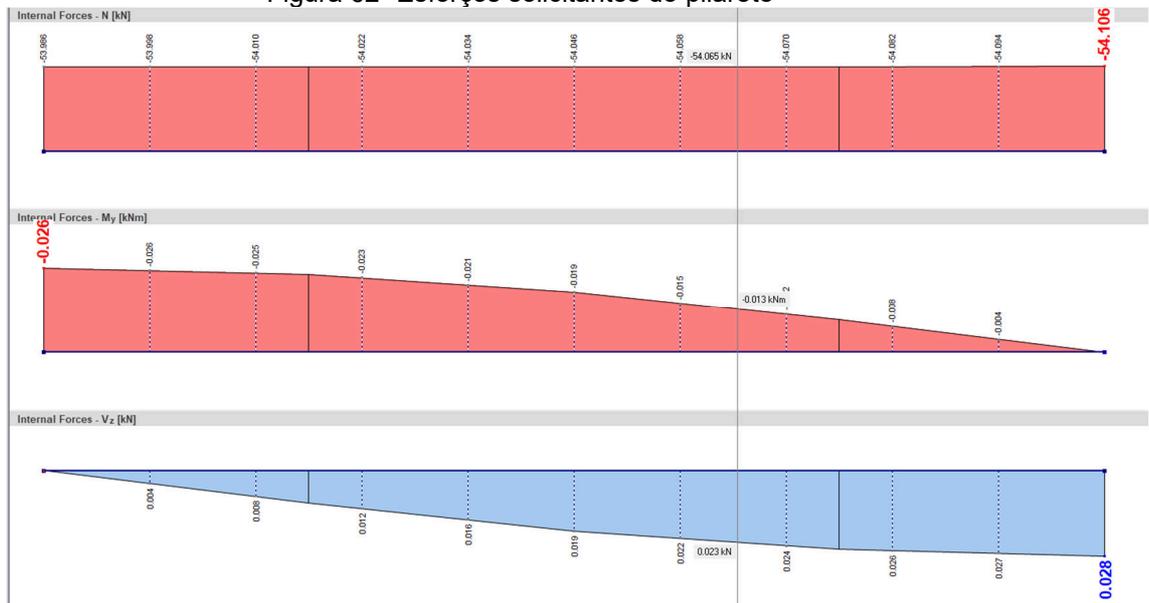
ELEMENTO	P16		
VERIFICAÇÕES DE ESBELTEZ RELATIVA	kcx	0,81	CAPACIDADE SOLICITADA
	kcy	0,81	
	VERIFICAÇÃO 1	0,800566611	80,06%
	VERIFICAÇÃO 2	0,835488201	83,55%
CISALHAMENTO LONGITUDINAL	fv0,d	1,01	CAPACIDADE SOLICITADA
	Td	0,10	
	VERIFICAÇÃO	0,10	10,02%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

6.4. Pilaretes da escada

Os pilaretes mais solicitados, assim como os pilares, enfrentam primordialmente esforços de compressão. O pilarete identificado como crítico está sujeito a uma compressão de cálculo de 54,106 kN, um momento de cálculo de 0,03 kNm, e um esforço cortante de cálculo de 0,03 kN, conforme ilustrado na Figura 62. Esses esforços são avaliados sob a condição de Estado Limite Último (ELU), com a sobrecarga atuando como carga principal e o vento a 0° como carga.

Figura 62- Esforços solicitantes do pilarete



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

6.4.1. Verificações de estabilidade – pilarete crítico

Nas verificações de estabilidade serão analisados a esbeltez e a esbeltez relativa.

- Esbeltez

O pilarete possui dimensões de 12,5 x 12,5 cm e 1,50 metros de comprimento destravado, com a inércia do pilarete descrita na Tabela 2, pela Equação 17 temos que a esbeltez do pilarete na direção X é de 41,57 e na direção Y 41,57.

$$\lambda_x = \frac{1,50}{\sqrt{\frac{2034,51}{156,25}}} = 41,57$$

$$\lambda_y = \frac{1,50}{\sqrt{\frac{2034,51}{156,25}}} = 41,57$$

Portanto, como as esbeltezes foram menores que 140, o pilarete passa na verificação de esbeltez.

- Esbeltez relativa

A esbeltez relativa leva em consideração, além das dimensões do pilarete, o valor de resistência à compressão característica da madeira, valor descrito na Tabela 1, logo, pelas Equações 19 e 20, o valor da esbeltez relativa em X é de 0,69 e em Y é de 0,69.

$$\lambda_x = \frac{41,57}{\pi} \sqrt{\frac{25}{9200}} = 0,69$$

$$\lambda_y = \frac{41,57}{\pi} \sqrt{\frac{25}{9200}} = 0,69$$

Com esses valores é necessário é necessário verificar as condições adicionais para as verificações de compressão e flexocompressão, tais verificações adicionais são descritas nas Equações 21 e 22.

Para verificar as Equações ditas no parágrafo anterior, antes é necessário encontrar o K_{cx} e K_{cy} , os quais dependem dos coeficientes K_x e K_y , dessa forma aplicando as Equações 25 e 26, obteve-se que $k_x = 0,93$ e $k_y = 0,93$.

$$K_x = 0,5 \left[1 + (0,69 - 0,3) + (0,69)^2 \right] = 0,93$$

$$K_y = 0,5 \left[1 + (0,69 - 0,3) + (0,69)^2 \right] = 0,93$$

Com os valores de k_x e k_y utiliza-se as Equações 23 e 24, assim obteve-se para $K_{cx} = 0,64$ e para $k_{cy} = 0,64$.

$$K_{cx} = \frac{1}{0,93 + \sqrt{0,93 - (0,69)^2}} = 0,64$$

$$K_{cy} = \frac{1}{0,93 + \sqrt{0,93 - (0,69)^2}} = 0,64$$

As verificações das Equações 21 e 22 são demonstradas após os as verificações de compressão e flexocompressão.

6.4.2.Verificações de solicitações normais – pilarete crítico

Nas verificações de estabilidade serão analisados a tração, compressão, flexotração, flexocompressão e verificações devido a esbeltez.

- Tração

O pilarete não está sujeito a esforços solicitantes de tração.

- Compressão

O pilarete sofre com esforço de compressão de cálculo de 54,106 kN. Aplicando-se a Equação 10 temos que: 3,46 MPa < 8,14 MPa. Logo, como a inequação é verdadeira o pilarete passa para solicitação de compressão com sua capacidade de solicitação igual a 42,53 %.

$$\frac{54,106}{156,25} \cdot 10 \leq 8,14 = 3,46 \leq 8,14$$

- Flexão reta

O pilarete é solicitado a um momento fletor de cálculo de 0,03 kNm. Dessa forma, aplicando-se a Equação 11 temos que: 0,01 < 1. Logo, como a inequação é verdadeira o pilarete passa na solicitação de flexão com sua capacidade de solicitação igual a 00,82%.

$$\frac{0,03}{\frac{3,26 \cdot 10^{-4}}{9,77 \cdot 10^3}} \leq 1 = 0,01 \leq 1$$

- Flexotração

O pilarete não sofre com esforços de tração

- Flexocompressão

O pilarete só possui esforços de momentos M_y , assim dispensa-se a utilização da Equação 14 para verificação de flexocompressão.

Com isso, resta fazer a verificação da Equação 15, a qual obtém-se que: 0,19 < 1. Logo, como a inequação é verdadeira, o pilarete passa nas solicitações de flexocompressão com sua capacidade de solicitação igual a 18,90%.

$$\left(\frac{3,46}{8,14}\right)^2 + 0 + \frac{0,08}{9,77} \leq 1 = 0,18 + 0 + 0,01 \leq 1 = 0,19 \leq 1$$

- Verificações adicionais devido a esbeltez

Para a verificação adicionais devido a esbeltez, utiliza os critérios de cálculo das Equações 21 e 22.

Dessa forma, com os valores de Kcx e Kcy encontrados, obteve-se que o pior caso foi pra verificação da Equação 25, em que o resultado foi $0,67 < 1$, logo como a inequação é verdadeira, o pilarete passa nas verificações adicionais devido a esbeltez com sua capacidade de solicitação igual a 67,19%

$$\frac{3,46}{0,64 \cdot 8,14} + 0 + 0,7 \frac{0,08}{9,77} \leq 1 = 0,66 + 0 + 0,01 \leq 1 = 0,67 \leq 1$$

$$\frac{3,46}{0,64 \cdot 8,14} + 0 + \frac{0,08}{9,77} \leq 1 = 0,66 + 0 + 0,01 \leq 1 = 0,67 \leq 1$$

6.4.3. Verificação de cisalhamento – pilarete crítico

O pilarete é solicitado a um esforço cortante de cálculo 0,03 kN. Com isso, ao aplicar a Equação 16, temos como resultado que: $0,01 \text{ MPa} < 1,01 \text{ MPa}$.

$$1,5 \cdot \frac{0,03}{156,25} \cdot 10 \leq 1,01 = 0,01 \leq 1,01$$

Portanto, como a inequação é verdadeira o pilarete passa na solicitação de cisalhamento longitudinal com sua capacidade de aproveitamento em 0,25 %.

6.4.4. Resumo de cálculo – pilarete crítico

A Tabela 26 sintetiza os valores discutidos para o pilarete estudada, percebe-se que ele passou em todas verificações e dessa forma, pode-se dizer que o pilarete é segura para a construção do edifício.

Tabela 26 - Resumo de cálculo pilarete crítico

ELEMENTO	PILARETES DA ESCADA		
COMPRIMENTO DO ELEMENTO (m)	1,5		
SEÇÃO	b (cm)	12,5	
	h (cm)	12,5	
ESFORÇOS DE CÁLCULO	M_{yd} (kNm)	0,03	
	V_d (kN)	0,03	
	N_d (kN)	-54,11	
INÉRCIA DO ELEMENTO	I_x (cm ⁴)	2.034,51	
	I_y (cm ⁴)	2.034,51	
ESBELTEZ	λ_x	41,57	OK
	λ_y	41,57	OK
ESBELTEZ RELATIVA	$\lambda_{rel,x}$	0,69	VERIFICAÇÕES EXTRAS
	$\lambda_{rel,y}$	0,69	VERIFICAÇÕES EXTRAS
ESTABILIDADE LATERAL DAS VIGAS	h/b	1	OK
	BM	5,98	
	L1/b	12	
	$E0,ef/(BM*fm,d)$	85,83	
TRAÇÃO	$ft_{0,d}$ (MPa)	5,86	CAPACIDADE SOLICITADA
	$Q_{N,td}$ (MPa)	NÃO HÁ	0,00%
COMPRESSÃO	$fc_{0,d}$ (MPa)	8,14	CAPACIDADE SOLICITADA
	$Q_{N,td}$ (MPa)	3,46	42,53%
FLEXÃO RETA	fm,d (MPa)	9,77	CAPACIDADE SOLICITADA
	W (m ³)	3,26E-04	
	$Q_{m,d}$ (MPa)	0,08	0,82%
FLEXOTRAÇÃO	$Q_{N,td} / ft_{0,d}$	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	$Q_{m,d} / fm,d$	0,01	
	VERIFICAÇÃO	NÃO HÁ	0,82%
FLEXOCOMPRESSÃO	$Q_{N,cd} / fc_{0,d}$	0,43	CAPACIDADE SOLICITADA
	$Q_{m,d} / fm,d$	0,01	
	VERIFICAÇÃO	0,19	18,90%
VERIFICAÇÕES DE ESBELTEZ RELATIVA	k_{cx}	0,64	CAPACIDADE SOLICITADA
	k_{cy}	0,64	
	VERIFICAÇÃO 1	0,669408513	66,94%

ELEMENTO	PILARETES DA ESCADA		
	VERIFICAÇÃO 2	0,671860724	67,19%
CISALHAMENTO LONGITUDINAL	fv0,d	1,01	CAPACIDADE SOLICITADA
	Td	0,00	
	VERIFICAÇÃO	0,00	0,25%

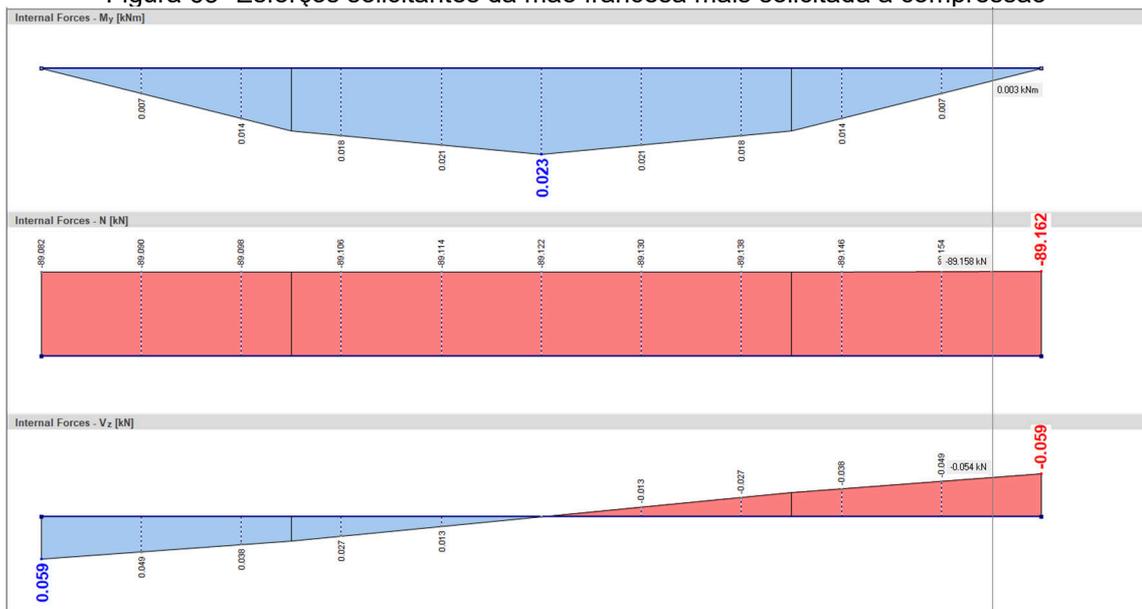
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

6.5. Mão francesa

A mão francesa é um componente crucial para o contraventamento e a estabilidade estrutural da edificação, principalmente submetida a esforços normais, como tração ou compressão. As mãos francesas que mais sofrem esses esforços foram identificadas e analisadas.

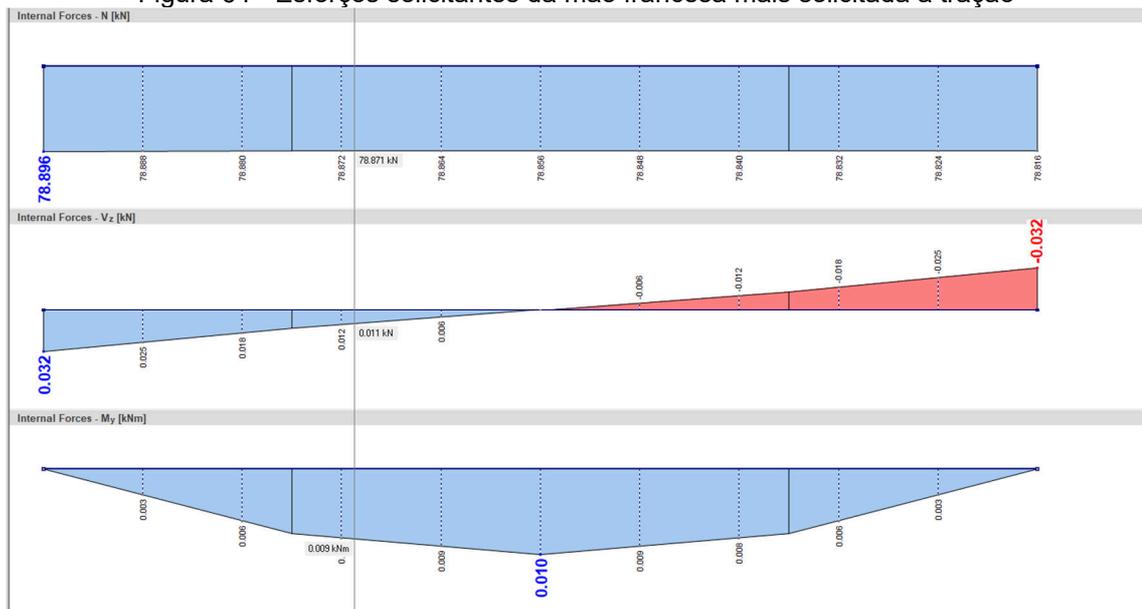
Os valores máximos de momento fletor e esforço cortante, considerando as duas mãos francesas mais solicitadas, são de 0,03 kNm para o momento fletor e 0,032 kN para o esforço cortante. Os valores para compressão e tração são, respectivamente, 89,162 kN (conforme ilustrado na Figura 63) e 78,896 kN (conforme ilustrado na Figura 64). A análise desses esforços foi realizada sob uma combinação de cargas onde o vento a 0° atua como a carga principal e a sobrecarga como secundária.

Figura 63- Esforços solicitantes da mão francesa mais solicitada à compressão



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 64 - Esforços solicitantes da mão francesa mais solicitada à tração



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

6.5.1. Verificações de estabilidade – mão francesa crítica

Nas verificações de estabilidade serão analisados a esbeltez e a esbeltez relativa.

- Esbeltez

A mão francesa possui dimensões de 13 x 13 cm e 1,41 metros, com a inércia da mão francesa descrita na Tabela 2, pela Equação 17 temos que a esbeltez da mão francesa na direção X é de 37,57 e na direção Y 37,57.

$$\lambda_x = \frac{1,41}{\sqrt{\frac{2308,08}{169}}} = 37,57$$

$$\lambda_y = \frac{4,48}{\sqrt{\frac{2308,08}{169}}} = 37,57$$

Portanto, como as esbeltezes foram menores que 140, a mão francesa passa na verificação de esbeltez.

- Esbeltez relativa

A esbeltez relativa leva em consideração, além das dimensões da mão francesa, o valor de resistência à compressão característica da madeira, valor descrito na Tabela 1, logo, pelas Equações 19 e 20, o valor da esbeltez relativa em X é de 0,62 e em Y é de 0,62.

$$\lambda_x = \frac{37,57}{\pi} \sqrt{\frac{25}{9200}} = 0,62$$

$$\lambda_y = \frac{37,57}{\pi} \sqrt{\frac{25}{9200}} = 0,62$$

Com esses valores é necessário é necessário verificar as condições adicionais para as verificações de compressão e flexocompressão, tais verificações adicionais são descritas nas Equações 21 e 22.

Para verificar as Equações ditas no parágrafo anterior, antes é necessário encontrar o K_{cx} e K_{cy} , os quais dependem dos coeficientes K_x e K_y , dessa forma aplicando as Equações 25 e 26, obteve-se que $k_x = 0,86$ e $k_y = 0,86$.

$$K_x = 0,5 \left[1 + (0,62 - 0,3) + (0,62)^2 \right] = 0,86$$

$$K_y = 0,5 \left[1 + (0,62 - 0,3) + (0,62)^2 \right] = 0,86$$

Com os valores de k_x e k_y utiliza-se as Equações 23 e 24, assim obteve-se para $K_{cx} = 0,69$ e para $k_{cy} = 0,69$.

$$K_{cx} = \frac{1}{0,86 + \sqrt{0,86 - (0,62)^2}} = 0,69$$

$$K_{cy} = \frac{1}{0,86 + \sqrt{0,86 - (0,62)^2}} = 0,69$$

As verificações das Equações 21 e 22 são demonstradas após os as verificações de compressão e flexo-compressão.

6.5.2.Verificações de solicitações normais – mão francesa crítica

Nas verificações de estabilidade serão analisados a tração, compressão, flexo-tração, flexo-compressão e verificações devido a esbeltez.

- Tração

A mão francesa sofre com esforço de tração de cálculo de 78,896 kN. Aplicando-se a Equação 9 temos que: 4,67 MPa < 5,86 MPa. Logo, como a inequação é verdadeira a mão francesa passa para solicitação de tração com sua capacidade de solicitação igual a 79,63%.

$$\frac{78,90}{169} \cdot 10 \leq 5,86 = 4,67 \leq 5,86$$

- Compressão

A mão francesa sofre com esforço de compressão de cálculo de 89,162 kN. Aplicando-se a Equação 10 temos que: 5,28 MPa < 8,14 MPa. Logo, como a inequação é verdadeira a mão francesa passa para solicitação de compressão com sua capacidade de solicitação igual a 64,79%.

$$\frac{89,16}{169} \cdot 10 \leq 8,14 = 5,28 \leq 8,14$$

- Flexão reta

A mão francesa é solicitada a um momento fletor de cálculo de 0,03 kNm. Dessa forma, aplicando-se a Equação 11 temos que: $0,01 < 1$. Logo, como a inequação é verdadeira a mão francesa passa na solicitação de flexão com sua capacidade de solicitação igual a 0,84%.

$$\frac{0,03}{\frac{3,66 \cdot 10^{-4}}{9,77 \cdot 10^3}} \leq 1 = 0,01 \leq 1$$

- Flexotração

A mão francesa só possui esforços de momentos M_y , assim dispensa-se a utilização da Equação 12 para verificação de flexotração.

Com isso, resta fazer a verificação da Equação 13, a qual obtém-se que: $0,80 < 1$. Logo, como a inequação é verdadeira, a mão francesa passa nas solicitações de flexotração com sua capacidade de solicitação igual a 80,47%.

$$\frac{4,67}{5,86} + 0 + \frac{0,08}{9,77} \leq 1 = 0,79 + 0 + 0,01 \leq 1 = 0,80 \leq 1$$

- Flexocompressão

A mão francesa só possui esforços de momentos M_y , assim dispensa-se a utilização da Equação 14 para verificação de flexocompressão.

Com isso, resta fazer a verificação da Equação 15, a qual obtém-se que: $0,65 < 1$. Logo, como a inequação é verdadeira, a mão francesa passa nas solicitações de flexocompressão com sua capacidade de solicitação igual a 64,79%.

$$\left(\frac{5,28}{8,14}\right)^2 + 0 + \frac{0,08}{9,77} \leq 1 = 0,64 + 0 + 0,01 \leq 1 = 0,65 \leq 1$$

- Verificações adicionais devido a esbeltez

Para a verificação adicionais devido a esbeltez, utiliza os critérios de cálculo das Equações 21 e 22.

Dessa forma, com os valores de K_{cx} e K_{cy} encontrados, obteve-se que o pior caso foi pra verificação da Equação 25, em que o resultado foi $0,94 < 1$, logo como a inequação é verdadeira, a mão francesa é passa nas verificações adicionais devido a ebeltez com sua capacidade de sollicitação igual a 94,31%

$$\frac{5,28}{0,69 \cdot 8,14} + 0 + 0,7 \frac{0,08}{9,77} \leq 1 = 0,93 + 0 + 0,01 \leq 1 = 0,94 \leq 1$$

$$\frac{5,28}{0,64 \cdot 8,14} + 0 + \frac{0,08}{9,77} \leq 1 = 0,93 + 0 + 0,01 \leq 1 = 0,94 \leq 1$$

6.5.3. Verificação de cisalhamento – mão francesa crítica

A mão francesa é sollicitada a um esforço cortante de cálculo 0,032 kN. Com isso, ao aplicar a Equação 16, temos como resultado que: 0,01 MPa < 1,01 MPa.

$$1,5 \cdot \frac{0,03}{169} \cdot 10 \leq 1,01 = 0,01 \leq 1,01$$

Portanto, como a inequação é verdadeira a mão francesa passa na sollicitação de cisalhamento longitudinal com sua capacidade de aproveitamento em 0,28 %.

6.5.4. Resumo de cálculo – mão francesa crítica

A Tabela 27 e 28 sintetiza os valores discutidos para a mão francesa estudada, percebe-se que ela passou em todas as verificações e dessa forma, pode-se dizer que a mão francesa é segura para a construção do edifício.

Tabela 27 - Verificações mão francesa à compressão

ELEMENTO	MÃO FRANCESA MAIS SOLICITADA À COMPRESSÃO		
COMPRIMENTO DO ELEMENTO (m)	1,41		
SEÇÃO	b (cm)	13	
	h (cm)	13	
ESFORÇOS DE CÁLCULO	M_{yd} (kNm)	0,03	
	V_d (kN)	0,03	
	N_d (kN)	-89,16	
INÉRCIA DO ELEMENTO	I_x (cm ⁴)	2.380,08	
	I_y (cm ⁴)	2.380,08	
ESBELTEZ	λ_x	37,57	OK
	λ_y	37,57	OK
ESBELTEZ RELATIVA	$\lambda_{rel,x}$	0,62	VERIFICAÇÕES EXTRAS
	$\lambda_{rel,y}$	0,62	VERIFICAÇÕES EXTRAS
ESTABILIDADE LATERAL DAS VIGAS	h/b	1	OK
	BM	5,98	
	L1/b	10,84615385	
	$E0,ef/(BM*fm,d)$	85,83	
TRAÇÃO	$ft_{0,d}$ (MPa)	5,86	CAPACIDADE SOLICITADA
	$Q_{N,td}$ (MPa)	NÃO HÁ	0,00%
COMPRESSÃO	$fc_{0,d}$ (MPa)	8,14	CAPACIDADE SOLICITADA
	$Q_{N,td}$ (MPa)	5,28	64,79%
FLEXÃO RETA	$f_{m,d}$ (MPa)	9,77	CAPACIDADE SOLICITADA
	W (m ³)	3,66E-04	
	$Q_{m,d}$ (MPa)	0,08	0,84%
FLEXOTRAÇÃO	$Q_{N,td} / ft_{0,d}$	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	$Q_{m,d} / f_{m,d}$	0,01	
	VERIFICAÇÃO	NÃO HÁ	0,84%
FLEXOCOMPRESSÃO	$Q_{N,cd} / fc_{0,d}$	0,65	CAPACIDADE SOLICITADA
	$Q_{m,d} / f_{m,d}$	0,01	
	VERIFICAÇÃO	0,43	42,82%
VERIFICAÇÕES DE ESBELTEZ RELATIVA	k_{cx}	0,69	CAPACIDADE SOLICITADA
	k_{cy}	0,69	
	VERIFICAÇÃO 1	0,940615313	94,06%
	VERIFICAÇÃO 2	0,943130705	94,31%
CISALHAMENTO LONGITUDINAL	$fv_{0,d}$	1,01	CAPACIDADE SOLICITADA
	T_d	0,00	

ELEMENTO	MÃO FRANCESA MAIS SOLICITADA À COMPRESSÃO		
	VERIFICAÇÃO	0,00	0,28%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 28 - Verificações mão francesa à tração

ELEMENTO	MÃO FRANCESA MAIS SOLICITADA À TRAÇÃO		
COMPRIMENTO DO ELEMENTO (m)	1,41		
SEÇÃO	b (cm)	13	
	h (cm)	13	
ESFORÇOS DE CÁLCULO	M_{yd} (kNm)	0,03	
	V_d (kN)	0,03	
	N_d (kN)	78,90	
INÉRCIA DO ELEMENTO	I_x (cm ⁴)	2.380,08	
	I_y (cm ⁴)	2.380,08	
ESBELTEZ	λ_x	37,57	OK
	λ_y	37,57	OK
ESBELTEZ RELATIVA	$\lambda_{rel,x}$	0,62	VERIFICAÇÕES EXTRAS
	$\lambda_{rel,y}$	0,62	VERIFICAÇÕES EXTRAS
ESTABILIDADE LATERAL DAS VIGAS	h/b	1	OK
	BM	5,98	
	L1/b	10,84615385	
	$E0,ef/(BM*fm,d)$	85,83	
TRAÇÃO	$ft_{0,d}$ (MPa)	5,86	CAPACIDADE SOLICITADA
	$Q_{N,td}$ (MPa)	4,67	79,63%
COMPRESSÃO	$fc_{0,d}$ (MPa)	8,14	CAPACIDADE SOLICITADA
	$Q_{N,td}$ (MPa)	NÃO HÁ	0,00%
FLEXÃO RETA	$f_{m,d}$ (MPa)	9,77	CAPACIDADE SOLICITADA
	W (m ³)	3,66E-04	
	$Q_{m,d}$ (MPa)	0,08	0,84%
FLEXOTRAÇÃO	$Q_{N,td} / ft_{0,d}$	0,80	CAPACIDADE SOLICITADA
	$Q_{m,d} / f_{m,d}$	0,01	
	VERIFICAÇÃO	0,805	80,47%
FLEXOCOMPRESSÃO	$Q_{N,cd} / fc_{0,d}$	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	$Q_{m,d} / f_{m,d}$	0,01	
	VERIFICAÇÃO	NÃO HÁ	0,84%
VERIFICAÇÕES DE ESBELTEZ RELATIVA	k_{cx}	NÃO HÁ	CAPACIDADE SOLICITADA
	k_{cy}	NÃO HÁ	

ELEMENTO	MÃO FRANCESA MAIS SOLICITADA À TRAÇÃO		
		VERIFICAÇÃO 1	NÃO HÁ
	VERIFICAÇÃO 2	NÃO HÁ	0,84%
CISALHAMENTO LONGITUDINAL	$f_{v0,d}$	1,01	CAPACIDADE SOLICITADA
	T_d	0,00	
	VERIFICAÇÃO	0,00	0,28%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

7. RESULTADOS PARA ESTADO DE LIMITE DE SERVIÇO

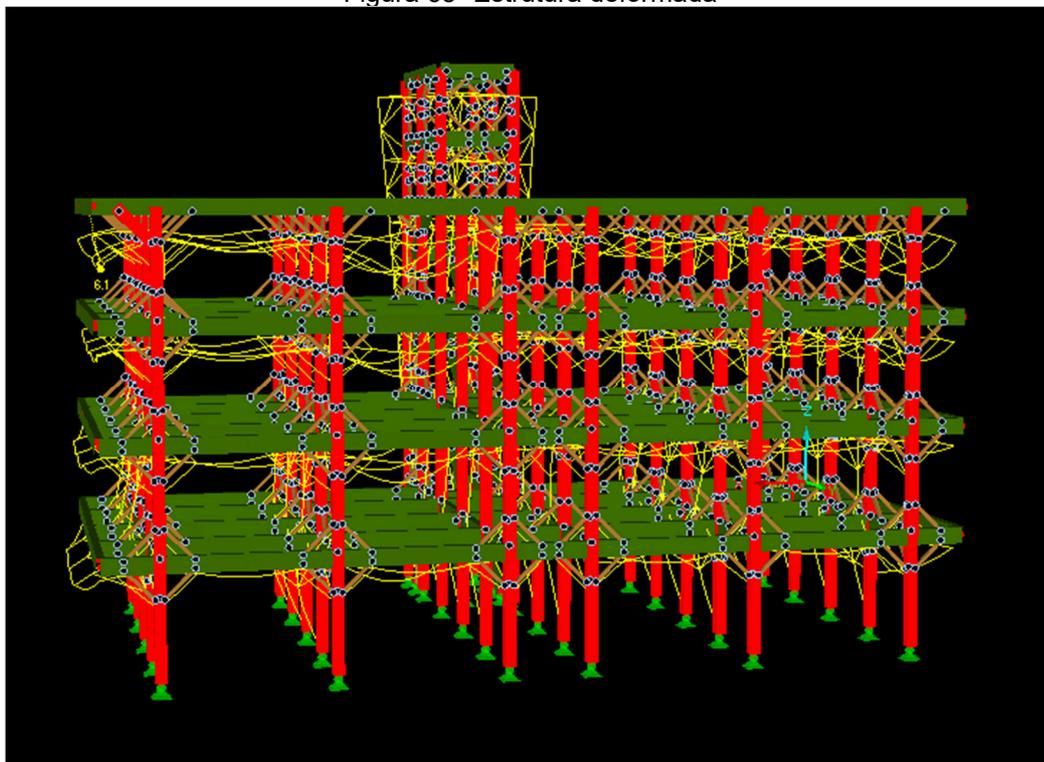
Na análise do estado de limite de serviço, a flecha máxima foi utilizada para a verificação dos elementos estruturais. A Figura 65 mostra a estrutura deformada, representada pela linha amarela, sob a combinação de estado de limite de serviço com o vento a 0° como carga principal e a sobrecarga como secundária. Nesta configuração, o deslocamento máximo observado é de 6,1 mm, valor que também representa a flecha máxima da estrutura dentre todos os estados de limite de serviço.

A viga identificada como crítica em termos de deslocamento é a V43, ilustrada na Figura 66. Esta viga possui um vão de 3,10 metros e, de acordo com o item 4.2, o deslocamento máximo para vigas biapoiadas é calculado pela divisão do comprimento da viga por 300. Isso resulta em uma flecha máxima permissível de 1,03 centímetros para essa viga, confirmando que a flecha está dentro do limite permitido pela norma.

No que se refere aos deslocamentos horizontais, a norma não especifica valores permissíveis máximos para pilares. Supondo que os deslocamentos permissíveis para os pilares sejam equivalentes aos das vigas, e considerando pilares biapoiados com um comprimento mínimo destravado de 2,00 metros, a flecha máxima permissível para os pilares seria de 0,67 cm. Como essa medida é maior do que a

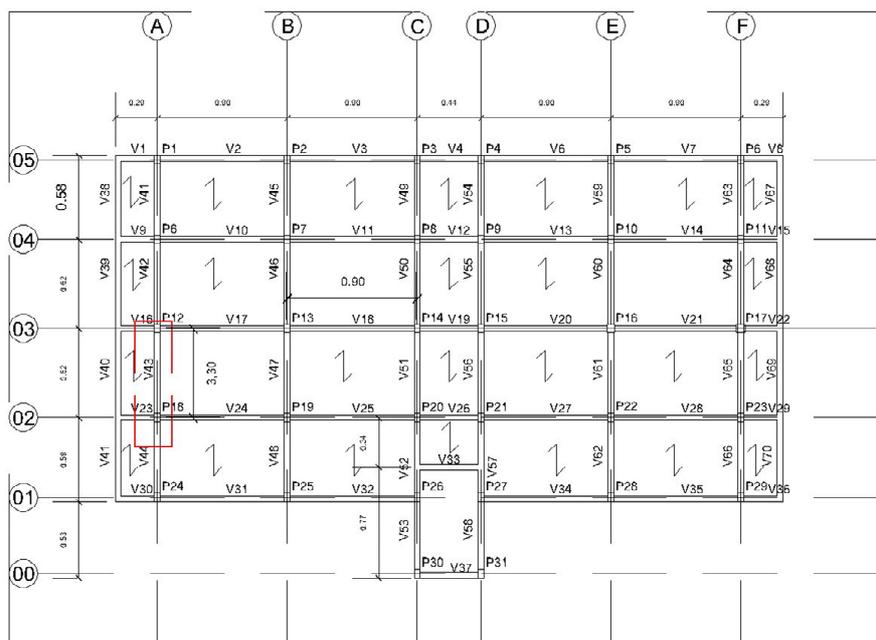
flecha máxima atuante observada na estrutura, verifica-se que não é necessário realizar verificações adicionais de deslocamentos horizontais nos pilares.

Figura 65- Estrutura deformada



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 66- Viga com flecha máxima atuante



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

8. DISCUSSÕES SOBRE OS RESULTADOS

A estrutura foi aprovada em ambas as verificações de estados de limite, sendo, portanto, considerada segura. A análise revelou algumas condições importantes com base nos resultados obtidos.

Primeiramente, nas peças estruturais submetidas à compressão, onde a esbelteza relativa excede 0,3, as verificações mais críticas estão relacionadas com a esbelteza. Por exemplo, em alguns elementos, como a viga crítica sujeita a esforço normal, a capacidade calculada quase dobrou em comparação à verificação de flexocompressão. Esta verificação adicional devido à esbelteza relativa reduz significativamente a resistência das peças de madeira sujeitas à compressão, portanto, deve ser cuidadosamente considerada no dimensionamento de peças estruturais de madeira.

Além disso, as vigas de piso, pré-dimensionadas com uma altura de 22,5 centímetros, mostraram uma capacidade solicitada em 99,77% para a viga de piso crítica na verificação de momento fletor. Para mitigar isso, a adição de novas vigas principais que se apoiam em outras vigas principais poderia reduzir o vão das vigas de piso, diminuindo conseqüentemente o momento fletor atuante sobre as vigas secundárias.

A utilização de peças cada vez menores, explorando ao máximo sua capacidade solicitada, desde que respeitados os critérios de segurança, é essencial para estruturas de madeira. A madeira laminada colada, por exemplo, possui um custo elevado, ultrapassando os 20 mil reais por metro cúbico. Portanto, é vital otimizar o uso de materiais, tanto para garantir a segurança quanto para viabilizar economicamente os projetos de construção em madeira.

9. CONCLUSÕES

A madeira, apesar de ter múltiplas aplicações na construção civil, ainda tem seu uso estrutural no Brasil predominantemente restrito a coberturas e residências de baixa renda, resultando em uma presença quase nula de madeiras industrializadas no mercado nacional.

Neste trabalho, observa-se um exemplo de aplicação integral da madeira na construção civil. O edifício em questão foi completamente construído utilizando madeira, com o fechamento em placas OSB e lajes do mesmo material. A estrutura principal foi composta por pilares, vigas, contraventamentos e pilaretes das escadas, todos em madeira, configurando uma edificação inteiramente de madeira.

A madeira, quando extraída de forma responsável, apresenta vantagens ecológicas significativas em comparação aos sistemas construtivos tradicionais. Em João Pessoa, utiliza-se madeira de reflorestamento que pode ser tratada e transformada em Madeira Laminada Colada (MLC), como é o caso da espécie Cloeziana.

Embora a madeira industrializada, como o MLC, possua um alto valor agregado, ela oferece benefícios como a eliminação da necessidade de formas e uma maior agilidade de construção em comparação com os métodos tradicionais em concreto.

O projeto apresentado utilizou MLC para construir um edifício residencial de pequeno porte de quatro pavimentos, cumprindo as verificações necessárias tanto em Estado Limite Último (ELU) quanto em Estado Limite de Serviço (ELS), alcançando o objetivo principal do trabalho.

Contudo, a viabilidade econômica do projeto é impactada pelo alto custo do material. Por exemplo, utilizando um preço base de 20 mil reais por m³ de MLC, um pilar de 35x35 cm e 16 metros teria um custo de 39,2 mil reais.

É importante destacar também a escassez de referências bibliográficas sobre o desenvolvimento de projetos estruturais em madeira, com a maioria das fontes disponíveis utilizando normas técnicas desatualizadas. Este fato reforça a necessidade de mais estudos e atualizações na área para fomentar o uso de madeira em construções mais diversificadas e economicamente viáveis.

Para futuros trabalhos, algumas recomendações podem ser feitas para expandir a compreensão e aplicabilidade dos conceitos abordados neste projeto:

Consideração de Ligações Semirrígidas: É recomendável a inclusão de ligações semirrígidas no modelo estrutural para aproximar os cálculos da realidade construtiva. Este tipo de ligação pode oferecer uma representação mais precisa do

comportamento das estruturas de madeira, especialmente em situações dinâmicas e sob cargas variáveis. Comparar esses resultados com os obtidos neste projeto pode revelar insights valiosos sobre as diferenças e possíveis melhorias no dimensionamento.

- Consideração de Resistência ao Fogo: Incorporar a resistência ao fogo no dimensionamento das peças estruturais.
- Estudo da Viabilidade Econômica: Realizar um estudo detalhado da viabilidade econômica do edifício proposto neste projeto.
- Comparação com Normas Anteriores: Sugere-se uma comparação dos resultados obtidos neste trabalho com aqueles baseados na norma NBR 7190 (1997). Tal comparação pode destacar as evoluções nas normativas e como elas influenciam o dimensionamento atual das estruturas de madeira.

Essas recomendações visam enriquecer futuras investigações e práticas de engenharia estrutural em madeira, promovendo uma construção mais segura, econômica e alinhada com os avanços tecnológicos e normativos.

REFERÊNCIAS

Archdaily. **O que é Madeira Laminada Colada (MLC ou Glulam)?**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/928061/o-que-e-madeira-laminada-colada-mlc-ou-glulam>> Acesso em 09 abr. 2024.

Archibald Joseph Macintyre. **Manual de instalações hidráulicas e sanitárias**. 1ª. LTC. 1990

Assembleia Legislativa do Estado do Ceará (ALECE). **Projeto sugere substituição de casas de taipa por alvenaria no Ceará**. Disponível em <<https://www3.al.ce.gov.br/index.php/ultimas-noticias/item/9290808922921projetocasas>> Acesso em 15 fev. 2024.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Forças devidas ao vento em edificações**: NBR 6123. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Instalação predial de água fria**: NBR 5626. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de madeira**: NBR 7191. Rio de Janeiro, 2022.

Blog Alea. **Entenda como é feita a montagem da parede de wood frame**. Disponível em: <<https://www.casasalea.com/blog/metodo-construtivo/entenda-como-e-feita-a-montagem-da-parede-de-wood-frame/>> Acesso em 17 fev. 2024.

Carajás. **Caixa d'água Polietileno 3.000L Azul – Fortlev**. Disponível em: <https://www.carajas.com.br/caixa-d-agua-polietileno-3-000l-azul---fortlev-040300188/p?idsku=3530®ion_id=000106&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAuYuv>

BhApEiwAzq_YiScfJ1atbPjWiA4wXZ05DvIN5JDeTm632J0JONbigKRaoZLEqdzArBo
CI94QAvD_BwE> Acesso em 03 mar. 2024

Casa e construção. **Escadas Externas – 84 Modelos surpreendentes na decoração externa!**. Disponível em: < <https://casaconstrucao.org/escadas/escadas-externas/> > Acesso em 17 mar. 2024.

Casa Vogue. **Os 10 prédios de madeira maciça mais altos do mundo.** Disponível em: < <https://casavogue.globo.com/arquitetura/edificios/noticia/2023/04/predios-de-madeira-macica-mais-altos-do-mundo.ghtml> > Acesso em 20 fev. 2024

Catálogo LP Bulding Products. **LP OSB Home Estrutural.** Disponível em: < https://www.lpbrasil.com.br/wp-content/uploads/2017/06/Catalogo_Tecnico_LP-OSB-APA.pdf > Acesso em: 27 fev. 2024.

Climate Data. **Clima João Pessoa (Brasil).** Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/paraiba/joao-pessoa-4983/>> Acesso em 03 abr. 2024

Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. **Uso sustentável da madeira na construção civil.** Disponível em: < http://www.cbcs.org.br/_5dotSystem/userFiles/posicionamentos/CBCS_CT Materiais_Posicionamento_Uso%20madeira.pdf > Acesso em 18 fev. 2024.

Cornetta arquitetura. **CASA MT.** Disponível em: < <https://cornettaarquitetura.com.br/madeira-laminada-colada-casa-mt/> > Acesso em 12 mar. 2024.

Romário Ferreira. MCMV de madeira: Conheça a tecnologia e os custos de construção do primeiro empreendimento em Wood Frame do programa Minha Casa, Minha Vida. **Construção Mercado**, v. 146, set. 2013. Disponível em: < <http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacaoconstrucao/146/artigo299692-1.aspx> >. Acesso em: 20 fev. 2024.

Íntegro. **Laje seca - A importância de uma instalação correta do chapeamento.** Disponível em: <<https://www.integroprojetos.com.br/blog-da-%C3%ADntegro/laje-seca-a-import%C3%A2ncia-de-uma-instala%C3%A7%C3%A3o-correta-do-chapeamento>> Acesso em 26 fev. 2024

Laporta Madeira. **MLC MADEIRA LAMINADA COLADA.** Disponível em: <https://laporta.com.br/products/mlc-madeira-laminada-colada?variant=44375522509107¤cy=BRL&utm_medium=product_sync&utm_source=google&utm_content=sag_organic&utm_campaign=sag_organic&srsId=AfmBOopRckdjm6QXfjvXKRhAV9wr0cMkke6IPvjpR8n-Xh8VeKJI0hCo5jA> Acesso em 16 abr. 2024

Leroy Merlin. **Rolo Isolante Termoacústico para Parede e Forro em Lã de Vidro Wallfelt WF 4+ 120x1250x5cm Isover.** Disponível em: <https://www.leroymerlin.com.br/rolo-isolante-termoacustico-para-parede-e-forro-em-la-de-vidro-wallfelt-wf-4--120x1250x5cm-isover_89334924> Acesso em 29 fev. 2024

Leroy Merlin. **Placa Cimentícia ProFort 1,20mx2,40mx8mm PlacLux.** Disponível em: <https://www.leroymerlin.com.br/placa-cimenticia-profot-1,20mx2,40mx8mm-placlux_89120514> Acesso em 29 fev. 2024

Organização das Nações Unidas. **Emissões de CO2 na área de construção civil atingem novo recorde.** Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2022/11/1805122>> Acesso em 18 fev. 2024.

PFEIL, Walter e PFEIL, Michèle. **Estruturas de Madeira.** 8ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003

Sua obra. **Escoramento de lajes.** Disponível em: <<https://www.suaobra.com.br/dicas/escoramento-de-lajes>> Acesso em 20 fev. 2024.

UMT Eucalipto Tratado. **Eucalipto Tratado em João Pessoa.** Disponível em: <<https://www.umteucaliptotratado.com.br/eucalipto-tratado-em-joao-pessoa.php>> Acesso em 19 fev. 2024.

Youtube. **Varanda com mão francesa.** Disponível em: <
<https://www.youtube.com/watch?v=SeLqZmCNd5I> > Acesso em 15 mar. 2024.