



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JOICE ALVES DA COSTA

**A MADEIRA COMO ELEMENTO ESTRUTURAL: PROJETO DE UMA
RESIDÊNCIA MODELO CASA POPULAR EM *WOOD FRAME*.**

Caraúbas-RN

2022

JOICE ALVES DA COSTA

**A MADEIRA COMO ELEMENTO ESTRUTURAL: PROJETO DE UMA
RESIDÊNCIA MODELO CASA POPULAR EM *WOOD FRAME*.**

Trabalho final de conclusão de curso
apresentado a Universidade Federal
Rural do Semi-Árido como requisito para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Wendell Rossine
Medeiros de Souza

Caraúbas-RN

2022

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

C837m Costa, Joice Alves da.
A madeira como elemento estrutural: projeto de
uma residência modelo casa popular em Wood Frame
/ Joice Alves da Costa. - 2022.
94 f. : il.

Orientador: Wendell Rossine Medeiros de Souza.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2022.

1. Wood Frame. 2. estruturas de madeira. 3.
Revit. 4. Robot. I. Souza, Wendell Rossine
Medeiros de , orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

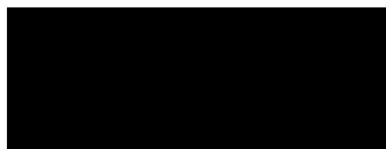
JOICE ALVES DA COSTA

**A MADEIRA COMO ELEMENTO ESTRUTURAL: PROJETO DE UMA RESIDÊNCIA
MODELO CASA POPULAR EM *WOOD FRAME*.**

Trabalho Final de Graduação apresentado
a Universidade Federal Rural do Semi-
Árido como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

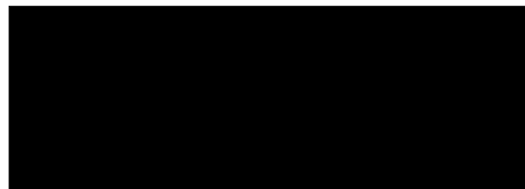
Defendida em: 10 / 06 / 2022.

BANCA EXAMINADORA



Assinado de forma digital por
WENDELL ROSSINE MEDEIROS DE
SOUZA
Dados: 2022.06.10 10:33:59 -03'00'

Wendell Rossine Medeiros de Souza, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente



Kleber Cavalcanti Cabral, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

ADNA ERICA MELO DE SOUSA
FONTES

Assinado de forma digital por ADNA
ERICA MELO DE SOUSA
FONTES
Dados: 2022.06.10 10:36:57 -03'00'

Adna Erica Melo de Sousa Fontes, Eng. Me. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por hoje poder concluir mais uma etapa tão significativa em minha vida.

Agradeço e dedico este trabalho aos meus pais, que sempre acreditaram nos meus sonhos e foram apoio e dedicação quanto precisei.

Aos meus colegas de faculdade pelos conhecimentos e experiências trocados que me permitiram crescer durante a jornada acadêmica.

Ao meu orientador, Dr. Wendell Rossine, pelos conhecimentos repassados e contribuições para que este trabalho fosse realizado.

E a todos aqueles que contribuíram de alguma forma, para a realização deste trabalho, que direta ou indiretamente fizeram parte de minha formação, o meu muito obrigado.

*“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar,
não seremos capazes de resolver os problemas
causados pela forma como nos acostumamos a ver o
mundo”.*

(Albert Einstein)

RESUMO

No Brasil, em grande parte das construções realizadas é utilizado o sistema convencional de estruturas em alvenaria, utilizando o concreto armado como principal elemento estrutural. No entanto, a geração de resíduos geram impactos significativos ao meio ambiente. Nesse sentido, a madeira é um material renovável, sendo amplamente utilizada nos Estados Unidos para construção de residências. Desse modo, este trabalho propõe-se a apresentar a utilização do sistema *Wood Frame* na construção de uma casa popular, sendo utilizada a madeira como elemento estrutural. Para isso, foi elaborada modelagem estrutural utilizando softwares para concepção estrutural e análise dos esforços. Os softwares utilizados foram o *Revit* e o *Robot Structural Analysis Professional*, os quais empregam a tecnologia BIM. Os resultados obtidos se mostraram satisfatórios, com a representação tridimensional do modelo elaborado e ótimas propriedades mecânicas para a madeira empregada, no qual o software eficiente na análise dos elementos, apresentando resultados detalhados e coerentes. Logo, as discussões sobre este trabalho contribuem, significativamente, para a disseminação e discussão do sistema de construção *Wood Frame*, a fim de gerar maior aceitabilidade do modelo.

Palavras chave: *Wood Frame*, estruturas de madeira, *Revit*, *Robot*.

ABSTRACT

In Brazil, in most of the constructions carried out, the conventional system of masonry structures is used, using reinforced concrete as the main structural element. However, the generation of waste generates significant impacts on the environment. In this sense, wood is a renewable material, being widely used in the United States for the construction of homes. Thus, this work proposes to present the use of the Wood Frame system in the construction of a popular house, using wood as a structural element. For this, structural modeling was developed using software for structural design and stress analysis. The software used were Revit and Robot Structural Analysis Professional, which employ BIM technology. The results obtained were satisfactory, with the three-dimensional representation of the elaborated model and excellent mechanical properties for the wood used, in which the software is efficient in the analysis of the elements, presenting detailed and coherent results. Therefore, discussions about this work significantly contribute to the dissemination and discussion of the Wood Frame construction system, in order to generate greater acceptability of the model.

Keywords: Wood Frame, wooden structures, Revit, Robot.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação da esbeltez.	29
Tabela 2: Área dos cômodos.	34
Tabela 3: Classes de umidade.	36
Tabela 4: Propriedades da <i>Pinus Taeda</i>	37
Tabela 5: Classes de carregamento.	38
Tabela 6: Valores de K_{mod1}	38
Tabela 7: Valores de K_{mod2}	39
Tabela 8: Coeficiente de minoração.	40
Tabela 9: Valores de resistência de dimensionamento.	40
Tabela 10: Sessões dos elementos estruturais.	41
Tabela 11: Propriedades geométricas dos elementos estruturais.	41
Tabela 12: Limitações do sistema <i>Wood Frame</i>	42
Tabela 13: Fatores de combinação cargas permanentes de grande variabilidade.	44
Tabela 14: Fatores de combinação e utilização.	44
Tabela 15: Cargas variáveis.	65
Tabela 16: Esforços de dimensionamento atuantes na viga	72
Tabela 17: Esforço atuante no montante	74
Tabela 18: Verificação dos montantes.	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Primeiras habitações de madeira.....	15
Figura 2: Loja de supermercados em madeira, na cidade de Québec.....	16
Figura 3 Ginásio com cobertura de madeira em Québec.....	16
Figura 4: Exemplo de casa em Wood Frame.....	17
Figura 05: Fundação radier.....	18
Figura 06: Montantes e soleiras.....	18
Figura 07: Revestimento dos montantes.....	19
Figura 08: Cobertura plana.....	21
Figura 09: Cobertura com tesouras.....	21
Figura 10: Cobertura tipo cumeeira.....	22
Figura 11: Primeiro edifício em <i>Wood Frame</i> no Brasil.....	23
Figura 12: Parâmetro de flambagem.....	28
Figura 13 - <i>Autodesk Robot Structural Analysis</i>	32
Figura 14: Software Revit Autodesk.....	33
Figura 15: Planta baixa.....	35
Figura 16: Paredes estruturais.....	45
Figura 17 - Fundação radier no <i>Revit®</i>	46
Figura 18 - Fundação laje radier.....	46
Figura 19- Linhas auxiliares e soleiras inferiores.....	47
Figura 20- Configuração dos montantes.....	48
Figura 21- Modelagem 3D do <i>Wood Frame</i>	49
Figura 22: Identificação das paredes.....	50
Figura 23: Parede 01.....	50
Figura 24: Parede 02.....	51
Figura 25: Parede 03.....	51
Figura 26: Parede 04.....	52
Figura 27: Parede 05.....	52
Figura 28: Parede 06.....	53
Figura 29: Parede 07.....	53
Figura 30: Parede 08.....	54
Figura 31: Parede 09.....	54

Figura 32: Parede 10.....	55
Figura 33- Modelo analítico no <i>Revit</i> ®.....	55
Figura 34 - Link para integração <i>Revit</i> ® – <i>Robot</i> ®.....	56
Figura 35 - Integração <i>Robot</i> ®.....	56
Figura 36 - Modelo analítico no <i>Robot</i> ®.....	57
Figura 37 - Criando apoios.....	57
Figura 38 - Modelo analítico e posição dos nós.....	58
Figura 39: Configurando material.....	59
Figura 40 - Modificando material.....	59
Figura 41 - Propriedades da madeira.....	59
Figura 42 - Criando cargas no <i>Robot</i> ®.....	61
Figura 43 - Criando tipo de cargas no <i>Robot</i> ®.....	61
Figura 44: Ações das telhas e ripas.....	62
Figura 45: Ações dos revestimentos.....	63
Figura 46: Características do reservatório.....	64
Figura 47: Ações do reservatório.....	65
Figura 48 - Cargas de utilização.....	66
Figura 49: Carga de utilização nos montantes.....	66
Figura 50: Vento na direção y.....	67
Figura 51: Vento na direção x.....	67
Figura 52: Carregamentos.....	68
Figura 53: Combinações das ações.....	68
Figura 54: Combinações cargas 01.....	69
Figura 55: Combinação de cargas 02.....	69
Figura 56 : Combinação de carga 03.....	69
Figura 57: Combinação de cargas 04.....	70
Figura 58 - Mensagem de cálculo.....	71
Figura 59 - Diagrama esforço cortante na viga de secção 6x12.....	71
Figura 60 - Propriedades da barra 155.....	72
Figura 61 - Propriedades do nó 77.....	75
Figura 62 - Propriedades da barra montante 45.....	75
Figura 63 - Tesoura para cobertura.....	78
Figura 64 - Instabilidade montante de apoio da tesoura.....	78
Figura 65 - Lista de membros estruturais.....	79

Figura 66 - Resultado de cálculo do montante 14.....80

Figura 67 - Resultado detalhado do montante 14.80

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVO	14
2.1 Objetivos gerais	14
2.2 Específicos.....	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 A madeira como elemento estrutural	15
3.2 Sistemas <i>Wood Frame</i>	16
3.3 Etapas construtivas e montagem	17
3.4 <i>Wood Frame</i> no Brasil.....	22
3.5 Sustentabilidade	23
3.6 Recomendações normativas para casas em <i>Wood Frame</i>	24
3.7 NBR 7190:1997- Projeto de Estruturas de Madeira	24
3.7.1 Dimensionamento Estados Limites Últimos	25
3.8 <i>Softwares</i>	32
3.8.1 <i>Autodesk Robot Structural Analysis</i>	32
3.8.2 <i>Autodesk Revit</i>	33
4. METODOLOGIA.....	34
4.1 Projeto Arquitetônico	34
4.2 Propriedades	35
4.2.1 Propriedades mecânicas dos elementos da estrutura.....	36
4.2.1.1 Coeficiente de modificação (K_{mod}).....	38
4.2.1.2 Resistência característica.....	39
4.2.1.3 Coeficiente de ponderação.....	40
4.2.2 Propriedades geométricas.....	41
4.3 Modelagem da concepção estrutural do sistema <i>Wood Frame</i> no <i>Revit</i> ®.....	42
4.4 Integração <i>Revit</i> ® – <i>Robot</i> ®.	43
4.5 Cálculos dos carregamentos	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
5.1 Modelagem do sistema <i>Wood Frame</i> no <i>Revit</i> ®.....	45
5.2 Estrutura no <i>Robot</i> ®.....	57

5.2.1 Configurando as propriedades mecânicas da madeira no <i>Robot</i> ®.	58
5.2.2 Carregamentos.....	60
5.3 Dimensionamento	71
5.3.1 Análises das vigas de madeira	71
5.3.2 Análises dos montantes.....	74
5.3.3 Tesouras.....	78
6- CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
REFERÊNCIAS.....	84

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das atividades mais importantes para o desenvolvimento econômico e social, no mundo. No entanto, devido ao crescente avanço das construções desordenadas e sem um planejamento adequado, tem se apresentado como uma grande geradora de impactos ambientais, devido o alto consumo de recursos naturais, a modificação da paisagem e o grande volume de resíduos gerados (PINTO, 2005).

Dessa forma, o setor da construção civil tem o desafio de buscar soluções que conciliem uma atividade produtiva com condições que propaguem o desenvolvimento sustentável consciente e menos agressivo ao meio ambiente (PINTO, 2005). Segundo Ribeiro et al. (2008), estima-se que a construção civil consome algo entre 20 e 50% do total de recursos naturais, o que nos mostra a necessidade de mudanças significativas para reduzir esse percentual.

Segundo Araújo et al. (2016), as casas de madeira são uma das alternativas de construção mais sustentáveis, sendo comumente utilizada em muitos países europeus e norte-americanos. As casas de madeira fornecem a solução mais comum, econômica e prática para a construção, além de apresentarem níveis adequados de durabilidade, acústica e conforto térmico.

A madeira pode ser considerada um produto sustentável, pois ela é um dos poucos materiais da construção civil que possui caráter renovável. Como a estrutura já vem pré-fabricada para o canteiro, o tempo de obra é otimizado. Além disso, a madeira possui alta resistência mecânica e a resistência à compressão apresenta valores semelhantes ao concreto (ALMEIDA et al., 2020).

Grande parte das casas americanas é construída em madeira, utilizando o sistema *Wood Frame*, que de acordo com Burrows (2014) fornecem uma habitação confortável e econômica. O *Wood Frame* é um sistema industrializado, composto por perfis montantes os quais passam por tratamento em autoclave para proteger de agentes pragas e fungos.

No Brasil, o sistema ainda é pouco discutido e necessita se desenvolver em estudos sobre construções mais ecológicas e econômicas. Desse modo, esse trabalho tem o intuito de apresentar a madeira como material estrutural, com intuito de aumentar as discussões sobre a empregabilidade do material no Brasil, a fim de

obter soluções e aceitabilidade. No qual foi empregado à tecnologia BIM, por meio de softwares da autodesk para projetar e analisar a concepção estrutural elaborada.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivo elaborar um projeto de casa popular utilizando a madeira como elemento estrutural, utilizando a integração de softwares da Autodesk. Realizando modelagem da estrutura no *Revit Software* e análise estrutural no *Software Robot Structural*.

2.2 Específicos

- Apresentar a madeira como elemento estrutural, enfatizando suas propriedades e benefícios na construção do *Wood Frame*;
- Elaborar modelagem estrutural utilizando o *software Revit ®* e representação tridimensional da estrutura.
- Utilizar a integração entre os *softwares Revit ® e Robot ®*;
- Realizar análise da estrutura utilizando o *Robot ®*.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A madeira como elemento estrutural

A madeira já possui histórico na construção civil há muitos anos, cujo âmbito de aplicações é extenso. Segundo Kuklík (2008a) as principais aplicações se destacam a construção de edifícios e pontes, maquinaria industrial e instrumentos de guerras e barcos.

As primeiras habitações de madeira surgiram a partir do homem primitivo (cerca de 12 000 a 40 000 a.C.), que entrelaçou galhos de madeira formando abrigos de planta circular. Já as primeiras casas de madeira surgiram por volta de 4500 a 3000 a.C., e foram construídas por agricultores, como mostra a Figura 01. No entanto, não se esperava que tais construções durassem tanto tempo, pelo fato de serem executadas de forma empírica, sem dimensionamento das estruturas e ligações (ALMEIDA,2012).

Figura 1: Primeiras habitações de madeira.



Fonte: Almeida (2012).

Durante os séculos XII e XIII, optaram por construir casas do tipo cabanas, utilizando madeira também na zona urbana. Porém a partir do século XIV passou-se a utilizar a pedra e o tijolo na construção de habitações, por esses apresentarem uma boa resistência ao fogo, preservando-se as coberturas em madeira, prática que sobrevive até hoje (ALMEIDA, 2012).

Já as pontes de madeira possuem registros de construção que datam cerca de 600.a.C. e foram destruídas precocemente devido às guerras, os desastres naturais e incêndio (ALMEIDA,2012).

Segundo o Instituto de Pesquisas e Tecnologia (2019), é impressionante a evolução do uso da madeira em construções no hemisfério norte, principalmente nos Estados Unidos, Canadá, Europa e Japão, além da Austrália. A Figura 02 e Figura 03 apresentam algumas construções em que foi empregada a madeira como elemento estrutural.

Figura 2: Loja de supermercados em madeira, na cidade de Québec.



Fonte: Instituto de Pesquisa Tecnológica (2019).

Figura 3 Ginásio com cobertura de madeira em Québec.



Fonte: Instituto de Pesquisa Tecnológica (2019)

3.2 Sistemas *Wood Frame*

O *Wood Frame* é um sistema construtivo em que se utiliza a madeira como elemento estrutural para construção de edifícios de até cinco pavimentos. Tal construção possui rápida execução e sustentabilidade, por serem empregados elementos pré-fabricados de madeira. Segundo Molina e Calil (2010), este sistema consegue associar a sua resistência característica a velocidade de construção, além de possuir um bom conforto térmico, absorvendo 40 vezes menos calor que os tijolos, o que o torna superior à alvenaria nesse quesito.

O sistema construtivo possui alta empregabilidade no exterior, estando presente, por exemplo, em cerca de 95% das construções residenciais nos EUA. De acordo com Burrows (2014), com o sistema *Wood Frame* é possível construir uma combinação de estruturas de madeira como telhados, treliças, montantes, vigas e

etc., que juntos formam um edifício capaz de resistir a cargas de ventos, cargas de operação e ocupação, de neve e terremotos, como é representado na Figura 04.

Figura 4: Exemplo de casa em Wood Frame.



Fonte: Construtora rápida (2020).

3.3 Etapas construtivas e montagem

O método construtivo do sistema *Wood Frame* pode ser realizado em fábrica ou executado diretamente no local da obra. A seguir, são apresentadas as etapas construtivas para execução da estrutura *Wood Frame*.

- **Fundação:**

O processo construtivo se inicia pela fundação, que varia de acordo com as características do solo e a carga do edifício, e deve ser adotada a solução que mais se adeque ao projeto. Segundo Molina e Calil (2010), em países que possuem inverno mais intenso, na fundação dessas casas são empregados paredes subterrâneas, chamadas de “*basement wall*”, com aproximadamente 60 cm formando um compartimento abaixo do nível do solo, servindo também para aumentar a temperatura das casas.

De acordo com a empresa Tecverde (2016), para terrenos planos ou pouco acidentados, dependendo das características do solo, o radier é a solução de fundação mais viável e rápida, pois além de servir como elemento de fundação serve também como piso para pavimento térreo. Como a estrutura *Wood Frame* são consideravelmente leve, a carga a ser suportada pela fundação é menor se

comparada à estrutura convencional. Além do radier, se destaca também as sapatas corridas como fundação mais utilizada no sistema (COINASKI e SIQUEIRA, 2016).

De acordo com Lima (2011), a fundação radier, representada na Figura 05, é do tipo direta ou superficial, onde é dimensionada uma laje maciça de concreto prevendo todas as instalações hidrossanitárias e elétricas, a qual recebe todas as cargas da estrutura e são distribuídas ao terreno.

Figura 05: Fundação radier.

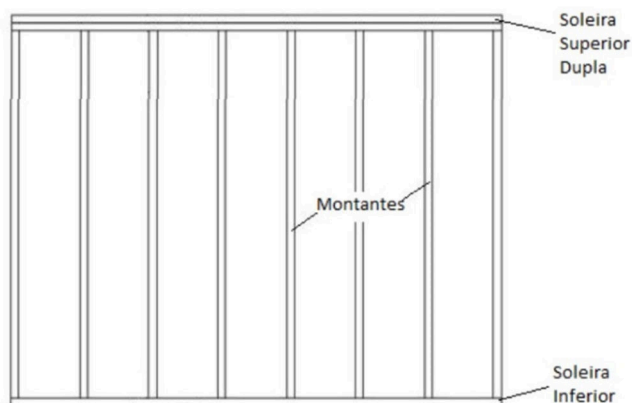


Fonte: DryPlan Engenharia, 2016.

- **Paredes:**

As paredes são executadas com estruturas compostas de montantes verticais, soleira inferior e superior, como é representado na Figura 06. Entre os montantes é empregado um isolador térmico-acústico, e para revestimento aplica-se chapa de OBS, membrana hidrófuga, placa cimentícia, gesso acartonado e/ou revestimento externo.

Figura 06: Montantes e soleiras.



Fonte: Cardoso, 2015.

A madeira utilizada normalmente recebe tratamento em autoclave, para ganhar maior durabilidade e resistência contra intemperes, como sol, chuva, humidade, ataque de fungos, insetos e cupins. De acordo com Allen e Thallon (2011), as madeiras mais utilizadas são provenientes de árvores coníferas de diferentes gêneros, como a Abies, Picea e Pinus. Sacco e Stamato (2010) também cita o pinus como a madeira mais utilizada no sistema *Wood Frame*, sendo o eucalipto pouco utilizado devido a sua baixa permeabilidade que dificulta o tratamento em autoclave, o que é essencial para evitar ataque de organismos.

O tratamento em autoclave, segundo a empresa Santa Clara Eucalipto Tratado (2016), consiste na aplicação de um composto de Arseniato de Cobre Cromatado (CCA), onde o Arsênico atua no ataque aos insetos, o Cobre mofos e bolores e o Cromo faz a fixação desses produtos na madeira.

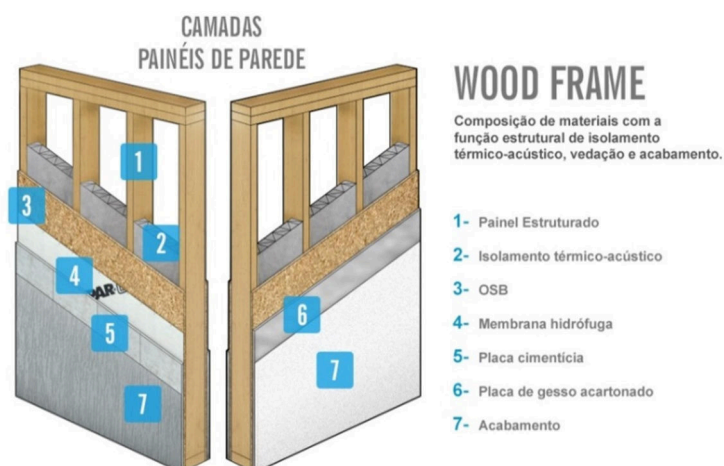
- **Revestimento**

De acordo com Molina e Calil (2010) podem ser utilizado para revestimento dos painéis de vidro, gesso acartonado, placas cimentícias, membrana hidrófuga, entre outros, os quais possuem finalidade específica, e podem ser aplicados tanto dentro quanto fora da casa.

A lã de vidro é empregada como elemento isolante térmico-acústico, o qual é aplicado entre os montantes. Em áreas molhadas, por exemplo, banheiro e cozinha, são utilizadas placas cimentícias ou ainda placas de gesso acartonado revestidas com azulejo (MOLINA E CALIL, 2010).

A Figura 07 da empresa Tecverde (2016), ilustra como comumente são empregados os revestimentos.

Figura 07: Revestimento dos montantes.



Fonte: Tecverde, 2016.

1- Painele estruturado: Composto por montantes e soleiras.

2- Isolamento térmico-acústico: De acordo com Espíndola (2017) os materiais mais frequentemente utilizados são: lã mineral, lã de rocha e fibra de vidro. Também estão disponíveis outras soluções no mercado como: fibra plásticas proveniente de reciclagem de garrafas PET, entre outros.

3- OSB: São utilizadas para o fechamento e são fixadas nos paines, além disso também possuem função de contraventamento (LP BRASIL, 2012).

4- Membrana hidrófuga: Segundo a empresa Tecverde (2020), a membrana hidrófuga tem a função de impedir que a umidade externa intensa entre na estrutura, porém possibilita que a umidade interna da casa saia, sendo está aplicada nas faces externas da casa.

5- Placa cimentícia: Normalmente empregadas em áreas molhadas, e faces externas.

6- Placa de gesso acartonado: Utilizadas nas paredes internas.

7- Acabamentos: Podem ser em revestimento cerâmico ou pintura.

- **Pisos:**

Estes são construídos normalmente utilizando vigas e placas de OSB (*Oriented Strand Board*) ou placa cimentícia, sendo as vigas normalmente de seção retangular ou I (MOLINA E CALIL (2010)). Em casas que se utiliza fundação radier, pode-se empregar apenas o contra piso no pavimento térreo.

- **Cobertura:**

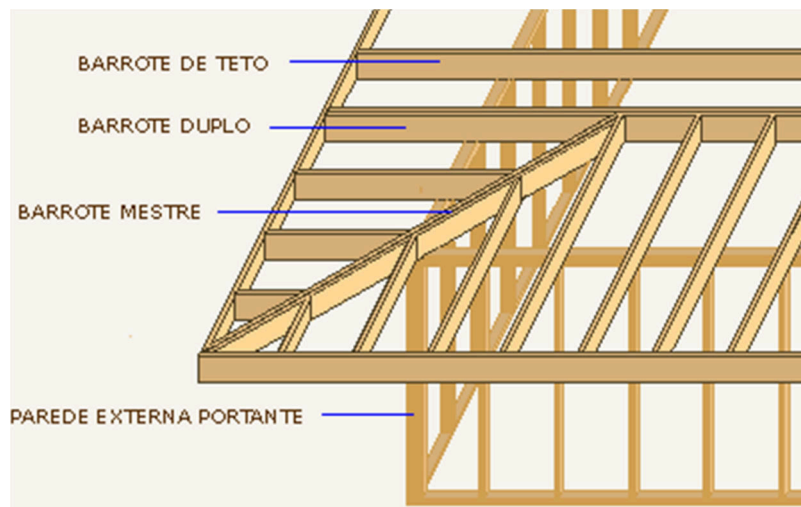
A cobertura das casas em *Wood frame* pode-se empregar qualquer tipo de telha, desde que estas sejam consideradas no dimensionamento do projeto. Logo são utilizadas treliças que são fixadas às soleiras superiores, para posteriormente receberem as telhas. Abaixo está descrito os tipos de coberturas mais utilizadas (USP, 2020).

Segundo informações do site da USP (2020), normalmente são empregados três tipos de coberturas distintas: tesouras, cumeeira e plana. O tipo de cobertura escolhida dependerá das condições de projeto.

As coberturas planas (Figura 08) são normalmente utilizadas quando não se deseja obter cobertura em plano horizontal, com leve inclinação. Estas devem ser

impermeabilizadas e acabadas.

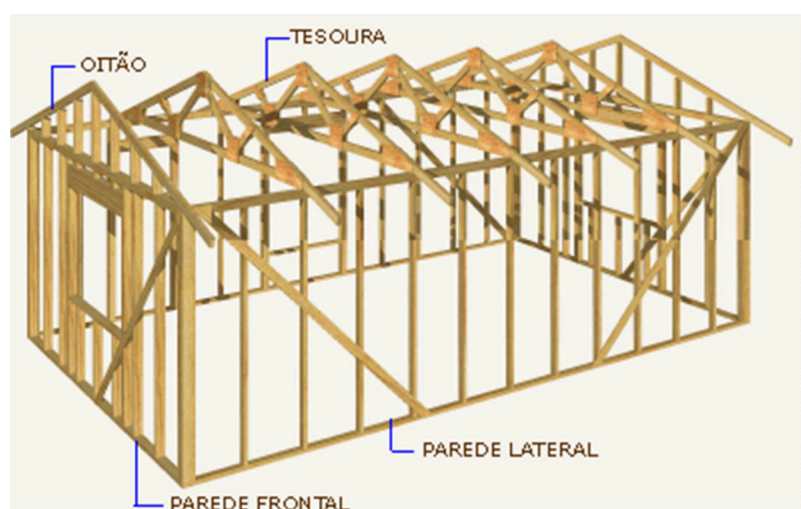
Figura 08: Cobertura plana.



Fonte: USP (2020).

As tesouras (Figura 09) são uma montagem de várias peças que formam uma estrutura rígida, normalmente triangular. Recomenda-se que o espaçamento entre elas seja de 60 cm, para que estas fiquem apoiadas sobre os montantes, permitindo melhor distribuição de cargas para as fundações. A seção mínima das peças é de 4x9 cm (USP, 2020).

Figura 09: Cobertura com tesouras.

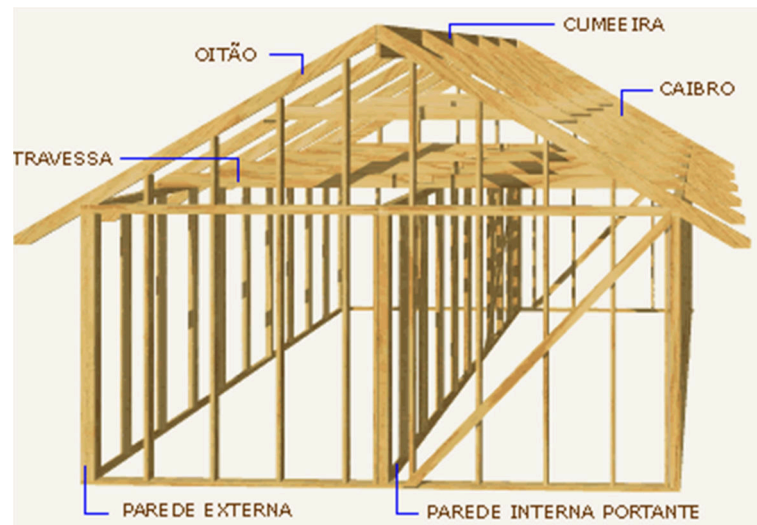


Fonte: USP (2020).

Já as coberturas do tipo cumeeira (Figura 10) são indicadas quando se quer utilizar cobertura com maiores inclinações e aproveitar o vão entre espaçamentos de

forro e telhado.

Figura 10: Cobertura tipo cumeeira.



Fonte: USP (2020).

3.4 Wood Frame no Brasil

A pesar da utilização da madeira como elemento estrutural há muitos anos, ela ainda é pouco empregada no Brasil. Países como EUA, é que utilizam o sistema em mais de 90% das residências (CRUZ, 2006).

O primeiro edifício em *Wood frame* do programa MCMV foi construído e inaugurado em 2008, recente se comparado a outros países.

A Tecverde (2016) é uma empresa brasileira no ramo das construções sustentáveis, a qual elabora projetos e executa casas e edifícios utilizando madeira. Apesar de ainda pouco conhecida, a empresa está em fase de crescimento e tem apresentado proposta a população, além dos benefícios, os quais são significativamente importantes para agregar no processo de aceitabilidade do país.

Como se sabe, a cultura das construções em alvenaria ainda carrega o preconceito quanto à confiabilidade de construções com a madeira, impondo-lhe conceitos de fragilidade, tanto mecânica quando a ação do fogo.

Figura 11: Primeiro edifício em *Wood Frame* no Brasil.



Fonte: Tecverde (2008).

3.5 Sustentabilidade

De acordo com Freitas (2009), a construção civil é reconhecida como uma grande geradora de impactos ambientais, tanto pelo consumo de recursos naturais, de origem não renovável, como pela geração de resíduos.

A cadeia de produção de construção civil no Brasil apresenta prejuízos ambientais, desde a extração da matéria-prima até aplicação, pois além de utilizar grande parcela de recursos naturais não renováveis e consumir grande quantidade de energia, tanto no transporte e no processamento do insumo, é ainda considerada uma grande geradora de resíduos. (ROTH., et al, 2009). Desse modo, mostrasse a necessidade de buscar soluções que se apresentem viáveis e que gerem menos impactos ao meio ambiente.

Segundo o biólogo Zenid (2015), a madeira possui diversas propriedades que a tornam atraente frente a outros materiais, sendo um material de fácil operação, tanto manualmente quanto por máquinas. Dentre essas propriedades podemos citar o baixo consumo de energia para o processamento, a alta resistência específica, as boas características de isolamento térmico e elétrico.

Além disso, a madeira utilizada no sistema *Wood Frame* é de reflorestamento, o que diminui significativamente os impactos ambientais através da utilização de recursos renováveis, economia de água e redução de resíduos, visto que este é um sistema industrializado (TORQUATO, 2010).

3.6 Recomendações normativas para casas em *Wood Frame*

No Brasil ainda não existem recomendações normativas para construções em *Wood Frame*, no entanto a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou recentemente que está sendo elaborada e o conteúdo do texto já está concluído. A ABNT NBR 16936 é a norma que está sendo preparada para edificações em light *Wood Frame*, e a mesma esteve aberta para consulta até dia 24 de fevereiro de 2021, e teve a participação na elaboração da Comissão de Estudos do Comitê da Construção Civil (ABNT/CB-002) e do Comitê Brasileiro de Madeira (ABNT/CB-31). A ABNT NBR 16936 permitirá que os profissionais consultem seu conteúdo para obter suporte técnico na utilização de tal tecnologia, *Wood Frame*.

Atualmente, os profissionais precisam utilizar normas internacionais para elaboração de seus projetos, como a Americana WFCM 2015 e as Europeias DIN 1052 (1998) e EUROCODE 5 parte 2 (1997). Além disso, é possível realizar o dimensionamento de peças de madeira isoladas, seguindo a norma técnica sobre estruturas de madeira presente no Brasil: NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, e com auxílio de outras normas, como a NBR 6120 de que trata sobre cargas em estruturas e a NBR 6123 sobre ações do vento nas estruturas.

Hoje as construções de madeira no Brasil devem seguir os parâmetros de segurança estabelecidos na NBR 7190:1997, a qual fixa as condições gerais que devem ser seguidas no projeto, na execução e no controle das estruturas correntes de madeira, tais como pontes, pontilhões, coberturas, pisos e cimbres (ABNT, 1997).

O SINAT – Sistema Nacional de Avaliações Técnicas de Produtos Inovadores e Sistemas convencionais possui uma diretriz de número 005, que estabelece uma série de diretrizes para construção de Sistemas construtivos estruturados em peças leves de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas (Sistemas leves tipo “*Light Wood Framing*”). Logo, o SINAT possui condições para avaliação, incluindo requisitos e critérios de desempenho. (SINAT, 2017).

3.7 NBR 7190:1997- Projeto de Estruturas de Madeira

De acordo com NBR 7190, toda estrutura deve ser projetada e construída de modo a permanecer adequada ao uso previsto, tendo-se em vista o custo de construção admitido e o prazo de referência da duração esperada, além de garantir

grau de confiabilidade apropriado, suportando todas as ações e outras influências que podem agir durante a construção e durante a sua utilização, a um custo razoável de manutenção (ABNT, 1997).

Os estados limites de uma estrutura são definidos como os estados os quais a estrutura apresenta desempenhos inadequados às finalidades da construção, sendo eles Estados Limites Últimos (ELU) e Estados Limites de Utilização (ELS).

O ELU é definido como estado em que por sua simples ocorrência determinam a paralisação, no todo ou em parte, do uso da construção, aos quais apresentam usualmente no projeto perda de equilíbrio, ruptura ou deformação excessiva dos materiais, transformação da estrutura, instabilidade por deformação e/ou instabilidade dinâmica (ressonância) (ABNT, 1997).

O ELS é definido como estado em que por sua ocorrência, repetição ou duração causam efeitos estruturais que não respeitam as condições especificadas para o uso normal da construção, ou que são indícios de comprometimento da durabilidade da construção, os quais apresentam deformações excessivas, que afetem a utilização normal da construção, e/ou vibrações de amplitude excessiva que causem desconforto aos usuários ou causem danos à construção (ABNT, 1997).

A seguir são apresentadas as recomendações normativas para verificação de peças estruturais de madeira obedecendo estados limites últimos e de serviço:

3.7.1 Dimensionamento Estados Limites Últimos

As peças estruturais no sistema de madeira estão sujeitas a diferentes tipos de esforços como, por exemplo, ações de compressão, tração, flexocompressão, entre outras.

Solicitações Normais

Quando as peças são submetidas à esforços normais axialmente, a condição de segurança é expressa pela equação:

$$\sigma_{nd} \leq f_{nd} \quad (3.8.1.1)$$

Onde,

σ_{nd} é tensão normal solicitante de cálculo

f_{nd} é tensão normal resistente de cálculo

A tensão normal solicitante de cálculo devido à atuação do esforço normal, que pode ser de compressão ou tração, pode ser definida pela expressão:

$$\sigma_{nd} = \frac{N_d}{b \cdot h} \quad (3.8.1.2)$$

Sendo N_d a força normal solicitante de cálculo e b e h as dimensões transversais do elemento estrutural.

Para as barras de madeira submetidas à compressão normal às fibras, a condição de segurança é expressa pela equação:

$$\sigma_{c90d} \leq f_{c90d} \quad (3.8.1.3)$$

Onde,

σ_{c90d} é a tensão normal de compressão perpendicular às fibras

f_{c90d} é a tensão resistente à compressão perpendicular às fibras

A tensão normal de compressão perpendicular às fibras pode ser definida pela expressão:

$$\sigma_{c90d} = \frac{F_d}{b \cdot c} \quad (3.8.1.4)$$

Sendo F_d a força solicitante normal à fibra, podendo ser a reação de apoio ou carga concentrada, e b e c são as dimensões da área de contato da carga atuante ou do apoio com o elemento estrutural.

As peças submetidas a flexão simples em que o plano de ação do momento fletor contém um eixo central de inércia da seção transversal resistente, a segurança fica garantida pela observância simultânea das seguintes condições.

$$\sigma_{c1d} \leq f_{cd} \quad (3.8.1.5)$$

$$\sigma_{t2d} \leq f_{td} \quad (3.8.1.6)$$

Onde σ_{c1d} e σ_{t2d} são as tensões atuantes de cálculo nas bordas mais comprimida e mais tracionada da seção transversal considerada, respectivamente. f_{cd} e f_{td} são a resistência à compressão e à tração de cálculo para a borda mais comprimida e mais tracionada. As tensões atuantes podem ser expressas pelas equações abaixo:

$$\sigma_{c1d} = \frac{M_d}{W_c} \quad (3.8.1.7)$$

$$\sigma_{t2d} = \frac{M_d}{W_t} \quad (3.8.1.8)$$

Sendo W_c e W_t os módulos de resistência. Definidos pela relação entre o momento de inércia da seção transversal e a distância do centro de gravidade da peça a borda comprimida ou tracionada, respectivamente. Para seções transversais retangulares, W_c e W_t possuem valores iguais, visto que a distância do centro de gravidade para a borda tracionada e comprimida é igual, logo pode ser expressa por:

$$W_c = W_t = \frac{I}{y} = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (3.8.1.9)$$

Logo a tensão atuante de cálculo nas bordas mais comprimidas e mais tracionadas se resume a seguinte expressão, para seção retangular:

$$\sigma_{c1d} = \sigma_{t2d} = \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2} \quad (3.8.1.10)$$

Onde, M_d é o momento solicitante de cálculo.

Nos casos em que a seção submetida a momento fletor cujo plano de ação não contém um dos eixos centrais de inércia, a condição de segurança é atendida verificando a flexão simples oblíqua, de acordo com a NBR 7190 (1997).

Ainda há casos em que as peças estão submetidas à flexão e a um esforço normal, denominadas de flexotração ou flexocompressão de acordo com o esforço normal solicitante. Nas barras submetidas à flexotração, a condição de segurança é expressa pela mais rigorosa das duas expressões abaixo:

$$\frac{\sigma_{Ntd}}{f_{tod}} + \frac{\sigma_{Mxd}}{f_{tod}} + K_M \cdot \frac{\sigma_{Myd}}{f_{tod}} \leq 1 \quad (3.8.1.11)$$

$$\frac{\sigma_{Ntd}}{f_{tod}} + K_M \cdot \frac{\sigma_{Mxd}}{f_{tod}} + \frac{\sigma_{Myd}}{f_{tod}} \leq 1 \quad (3.8.1.12)$$

Onde, σ_{Ntd} é o valor de cálculo da parcela de tensão normal atuante em virtude apenas da força normal de tração, f_{tod} é a resistência de cálculo à tração paralela às fibras, K_M é coeficiente de correção o qual deve ser adotado 0,5 para

seção retangular e 1,0 para as demais seções, σ_{Mxd} e σ_{Myd} são as tensões máximas devidas às componentes de flexão atuantes segundo as direções principais.

Nas barras submetidas à flexocompressão se fazem necessárias a verificação de estabilidade e a segurança relativa à resistência das seções transversais. A condição de segurança relativa à resistência das seções é expressa pela mais rigorosa das duas expressões seguintes:

$$\left(\frac{\sigma_{Ncd}}{f_{cod}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Mxd}}{f_{cod}} + K_M * \frac{\sigma_{Myd}}{f_{cod}} \leq 1 \quad (3.8.1.13)$$

$$\left(\frac{\sigma_{Ncd}}{f_{cod}}\right)^2 + K_M * \frac{\sigma_{Mxd}}{f_{cod}} + \frac{\sigma_{Myd}}{f_{cod}} \leq 1 \quad (3.8.1.14)$$

Onde, σ_{Ncd} é o valor de cálculo da parcela de tensão normal atuante em virtude apenas da força normal de compressão e f_{cod} é a resistência de cálculo à compressão paralela às fibras.

Verificação de estabilidade

Uma peça quando comprimida axialmente tende a se deslocar lateralmente, esse deslocamento é denominado flambagem. Logo, para evitar tal deslocamento a peça deve ser dimensionada de acordo com o índice de esbeltez da peça (λ).

$$\lambda = \frac{L_0}{i_{min}} \quad (3.8.1.15)$$

Onde L_0 é um comprimento teórico de referência e i_{min} é o raio de giração mínimo de sua seção transversal.

O comprimento teórico de referência é definido em função do comprimento destravado da peça e os apoios, sendo expresso pela equação:

$$L_0 = L * K \quad (3.8.1.16)$$

Sendo K parâmetro de flambagem, que pode ser definido de acordo com a Figura 13.

Figura 12: Parâmetro de flambagem.

A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio		Rotação e translação impedidas				
		Rotação livre, translação impedida				
		Rotação impedida, translação livre				
		Rotação e translação livres				

Fonte: Portincun3D (2021).

De acordo com o disposto na NBR 7190 (1997), quando peças estão submetidas à compressão, o índice de esbeltez recebe 3 classificações: peças curtas, peças medianamente esbeltas e peças esbeltas. Esta classificação pode ser definida de acordo com Tabela 01:

Tabela 1: Classificação da esbeltez.

Classificação	Esbeltez
Curta	≤ 40
Medianamente esbelta	$40 < \lambda \leq 80$
Esbelta	$\lambda > 80$

Fonte: Adaptada ABNT (1997).

Quanto maior a esbeltez de uma peça, maiores devem ser os cuidados no dimensionamento. A norma não recomenda a utilização de peças com esbeltez maior que 140.

Para peças classificadas como curtas, que na condição de projeto são admitidas como solicitadas à flexocompressão, a condição de segurança é atendida pelas expressões (3.8.1.13) e (3.8.1.14).

Para peças classificadas como medianamente esbeltas, além da verificação das expressões (3.8.1.13) e (3.8.1.14), deve-se verificar a segurança relativa ao

estado limite último de instabilidade, expressa pela seguinte equação:

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{cod}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{cod}} \leq 1 \quad (3.8.1.17)$$

Sendo σ_{Nd} o valor de cálculo da tensão de compressão devida à força normal de compressão e σ_{Md} valor de cálculo da tensão de compressão devida ao momento fletor M_d . De modo que o momento fletor pode ser expresso pela equação:

$$M_d = N_d * e_d \quad (3.8.1.18)$$

$$e_d = e_1 \left(\frac{F_E}{F_E - N_d} \right) \quad (3.8.1.19)$$

$$e_1 = e_i + e_a \quad (3.8.1.20)$$

A excentricidade e_i é devido à presença do momento M_{1d} , não devendo ser valor menor que $h/30$. E a excentricidade acidental e_a é devido às imperfeições geométricas das peças. Ambas podem ser expressas pelas seguintes equações, respectivamente:

$$e_i = \frac{M_{1d}}{N_d} \quad (3.8.1.21)$$

$$e_a = \frac{L_0}{300} \quad (3.8.1.22)$$

A carga crítica F_E é calculada em função do módulo de elasticidade efetivo, momento de inércia e o comprimento de flambagem. Pode ser expressa por:

$$F_E = \frac{\pi^2 E_{coef} I}{L_0^2} \quad (3.8.1.23)$$

Para as peças classificadas como esbeltas, a condição apresentada pela expressão (3.8.1.17) se mantém, de modo que se acrescenta uma nova excentricidade no cálculo do momento fletor, denominada excentricidade suplementar de primeira ordem que representa a fluência da madeira.

$$M_d = N_d * (e_i + e_a + e_c) \left(\frac{F_E}{F_E - N_d} \right) \quad (3.8.1.24)$$

Sendo e_a dado pela expressão (3.8.1.21) não se tomando valor menor que $h/30$. A excentricidade suplementar é expressa pela equação abaixo, onde N_{gK} e N_{qK} são valores característicos da força normal devidos às cargas permanentes e variáveis.

$$e_c = (e_{ig} + e_a \left\{ \exp \left[\frac{\phi [N_{gK} + (\psi_1 + \psi_2) N_{qK}]}{F_E - [N_{gK} + (\psi_1 + \psi_2) N_{qK}]} \right] - 1 \right\}) \quad (3.8.1.25)$$

$$e_{ig} = \frac{M_{1gd}}{N_{gd}} \quad (3.8.1.26)$$

O coeficiente de fluência (ϕ) é dado em função da classe de carregamento e da classe de umidade. Os valores de Ψ são fatores de combinação e utilização. Ambos podem ser determinados a partir das tabelas disponíveis na NBR 7190 (1997).

Solicitações tangenciais

Nas vigas submetidas à flexão com força cortante, a condição de segurança em relação às tensões tangenciais é expressa por:

$$\tau_d \leq f_{v0d} \quad (3.8.1.27)$$

De modo que τ_d é a máxima tensão de cisalhamento atuando no ponto mais solicitado da peça. Nas vigas de seção retangular, este valor pode ser determinado pela expressão:

$$\tau_d = \frac{3 V_d}{2 b h} \quad (3.8.1.28)$$

Estabilidade lateral das vigas de seção retangular

A NBR 7190 traz em seu tópico 7.5.6 que se dispensa a essa verificação da segurança em relação ao estado limite último de instabilidade lateral quando forem satisfeitas as seguintes condições, sendo B_m coeficiente de correção disponível na norma:

$$L_1 \leq \frac{E_{cef} * b}{\beta_M * f_{cd}} \quad (3.8.1.29)$$

3.8 Softwares

A tecnologia BIM (Building Information Modeling) é uma plataforma digital que aperfeiçoa o gerenciamento de projetos arquitetônicos, estruturais e mecânicos, estando cada vez mais presente na área da construção civil como um todo. Essa tecnologia pretende especificar e unir as informações e os atributos dos projetos de uma construção de forma integrada e organizada, assim, problemas na execução da obra são evitados. Isso proporciona uma redução significativa dos custos da obra, além de aumentar a qualidade das edificações (ALVARENGA; CARVALHO, 2020)

Um modelo 3D detalhado da obra, por exemplo, garante um resultado muito mais minucioso e fiel do que os protótipos 2D ou mesmo modelos que garantam apenas algumas perspectivas em 3D (ALVARENGA; CARVALHO, 2020). Os *softwares Robot Structural Analysis* e *Revit* são exemplos de interfaces que empregam a tecnologia BIM para elaboração de projetos.

3.8.1 Autodesk Robot Structural Analysis

O *Robot®* (Figura 12) é um *software* de análise estrutural avançado que permite realizar análises lineares e não lineares de modelos de construção, pontes e outros tipos de estruturas industriais, onde pode ser implementado o tipo de material a ser utilizado na concepção estrutural. Duarte (2019) ressalta que este é um *software* colaborativo e versátil, desenvolvido para o BIM, que fornece ferramentas avançadas de análise e *design*, o qual permite compreender o comportamento de qualquer tipo de estrutura.

Figura 13 - Autodesk Robot Structural Analysis



Fonte: Autodesk (2022).

Este programa possui a versão estudantil, o que facilita o acesso para estudantes, podendo ser utilizado por professores como ferramenta de ensino, além de possuir uma interface simples, de fácil manuseio, modelagem e análise de dados. Segundo Piza (2017), o *Autodesk Robot Structural Analysis Professional* auxilia

engenheiros em diversos cálculos estruturais e permite tanto a modelagem 2D como 3D, além de possuir um *link* que permite a integração com *Revit*®, *software* também da *Autodesk*, facilitando o intercâmbio dos dados entre os dois programas, proporcionando transferência e atualizações precisas de modelos, pois possui uma paramétrica gestão de mudanças, que mantém todos os documentos atualizados (PIZA, 2017).

3.8.2 Autodesk Revit

O *Revit* é um software desenvolvido pela empresa Autodesk, mesma empresa tem os domínios de um dos programas computacionais de engenharia mais famosos, o AutoCAD (ALVARENGA; CARVALHO, 2020). Esta ferramenta utiliza o novo conceito do BIM, com o qual os edifícios são criados de uma nova maneira.

O nome *Revit* vem das palavras em inglês “*Revise Instantly*”, que significam Revise Instantaneamente, ou seja, ao desenhar no *Revit*, as alterações de um objeto se dão instantaneamente em todos os objetos iguais de maneira simultânea e em todas as vistas do desenho em que ele aparece de forma imediata (LIMA, 2014).

Figura 14: Software Revit Autodesk



Fonte: Autodesk (2022).

4. METODOLOGIA

Este trabalho tem como base a utilização de dois *softwares*, o *Revit*® e *Software Robot Structural*, ambos da Autodesk, com a finalidade de desenvolver projeto arquitetônico da residência e análise estrutural dos esforços atuantes, respectivamente. Inicialmente foi elaborada a planta de um imóvel popular utilizando o *Revit*®. Além do projeto arquitetônico, foi elaborada também a modelagem da concepção estrutural do sistema, para facilitar na visualização dos elementos estruturais e permitir a integração dos *softwares Revit*® e *Robot*®, mais uma tecnologia BIM.

A segunda etapa do projeto ocorre na utilização do *Robot*®, com a estrutura já modelada, as cargas foram inseridas para análise da concepção estrutural através de um modelo analítico, onde se pôde analisar a estrutura, fazer as alterações necessárias e discutir seus resultados.

4.1 Projeto Arquitetônico

A residência é formada por uma área total de 70,30 m² dividido em nove cômodos, sendo eles dois quartos, sala, cozinha, banheiro, área de serviço, hall, despensa e garagem. O pé direito utilizado no projeto é de 2,80 m. Os valores de área do projeto estão dispostos na Tabela 02.

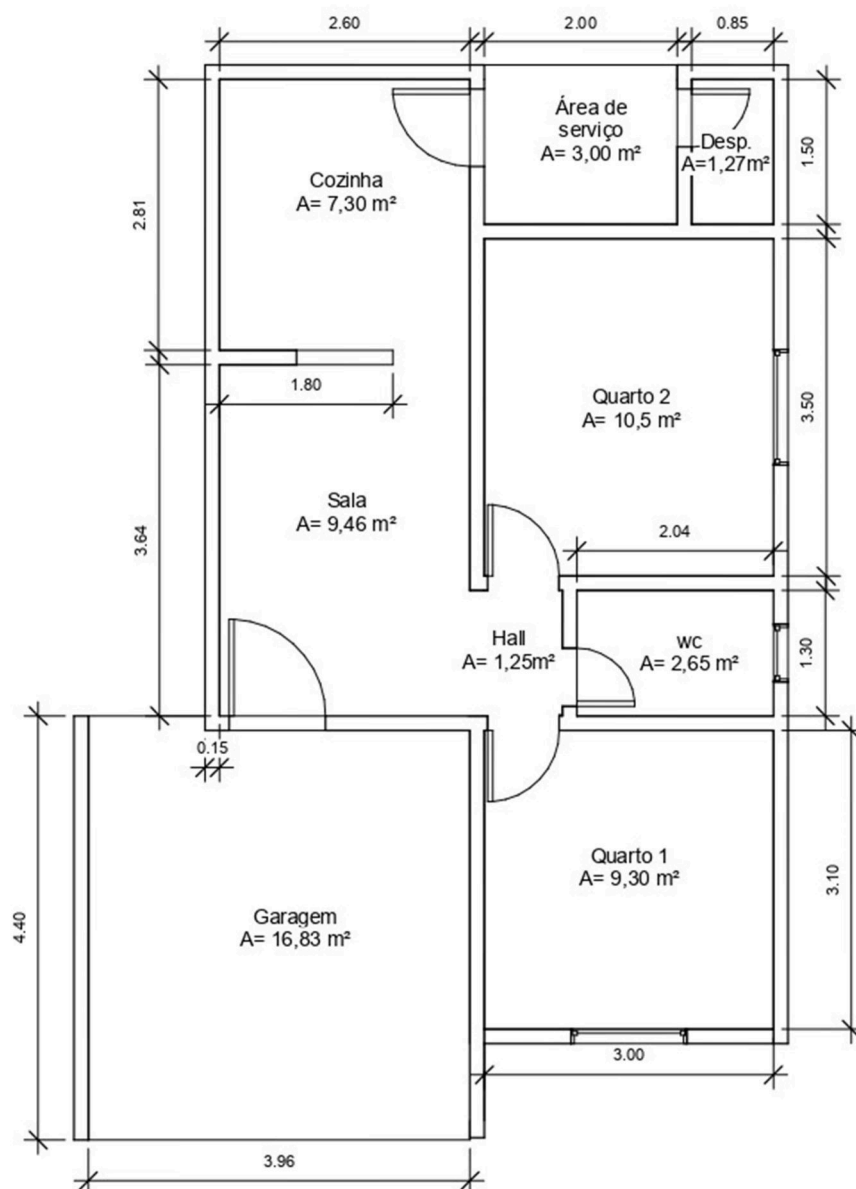
Tabela 2: Área dos cômodos.

Cômodos	Área (m ²)
Garagem	16,83
Sala	9,46
Quarto 1	9,3
Quarto 2	10,5
Hall	1,25
Banheiro	2,65
Cozinha	7,3
Área de serviço	3,0
Despensa	1,27

Fonte: O autor (2021).

O projeto arquitetônico do imóvel é apresentado abaixo, na Figura 14.

Figura 15: Planta baixa.



Fonte: O autor (2022).

4.2 Propriedades

A madeira escolhida para este trabalho foi a *Pinus taeda*, visto que ela é uma das espécies mais plantadas no Brasil entre os pinus, abrangendo aproximadamente um milhão de hectares, de acordo com dados da EMBRAPA, 2020. Além disso, o

pinus se destaca como a madeira mais utilizada nas construções em *Wood Frame* por americanos.

4.2.1 Propriedades mecânicas dos elementos da estrutura.

De acordo com a NBR 7190:1997, as propriedades da madeira são condicionadas por sua estrutura anatômica, e estas devem se distinguir os valores correspondentes à tração dos valores a compressão, assim como os valores correspondentes à direção paralela as fibras das normais às fibras. Ainda ressalta que estas propriedades devem se distinguir conforme variação dos valores referentes a classes de umidade da madeira.

A classe de umidade (Tabela 03) da madeira tem por objetivo ajustar propriedades mecânicas e de rigidez da madeira, em função do local/ambiente em que a estrutura será empregada, possibilitando assim determinar o tratamento a ser empregado.

Tabela 3 - Classes de umidade.

Classe de umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Umidade de equilíbrio
1	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$85\% < U_{amb}$, durante longos períodos	$\geq 25\%$

Fonte: Adaptada da NBR 7190 (1997).

Logo, a classe de umidade adotada nesse trabalho corresponde a classe de umidade 2, a qual o teor de umidade de equilíbrio da madeira está definido em 15%.

No anexo E da NBR 7190 possui uma tabela que apresenta valores médios obtidos em ensaios de laboratório das propriedades de rigidez e resistência de diversas madeiras nativas e de florestamento. Na Tabela 04 apresenta os valores médios para a *Pinus taeda*:

Tabela 4: Propriedades da *Pinus Taeda*.

Nome comum	Nome científico	ρ_{ap} (12%) Kg/m ³	f_{c0} Mpa	f_{t0} Mpa	f_{t90} Mpa	f_v Mpa	E_{c0} Mpa
<i>Pinus taeda</i>	<i>Pinus taeda</i> L.	645	44,4	82,8	2,8	7,7	13304

Fonte: ABNT (1997).

Sendo:

ρ_{ap} (12%) – Massa específica aparente à 12% de umidade;

f_{c0} – Resistência à compressão paralela às fibras;

f_{t0} – Resistência à tração paralela às fibras;

f_{t90} – Resistência à tração normal às fibras;

f_v – Resistência ao cisalhamento;

E_{c0} – Módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralelo as fibras;

Os valores médios apresentados na Tabela 04 foram obtidos em ensaio com 15 corpos de prova, a partir dos quais deve-se calcular as resistências de dimensionamento. Os valores de cálculo para resistências são dados pela Equação 01:

$$f_{wd} = k_{mod} \frac{f_{wk}}{\gamma_w} \quad (1)$$

Onde:

k_{mod} – Coeficiente de modificação

f_{wk} - Resistência característica

γ_w - Coeficiente de ponderação

A seguir são apresentados as definições e cálculos realizados para determinar esses coeficientes.

4.2.1.1 Coeficiente de modificação (K_{mod})

O coeficiente afeta os valores de propriedades da madeira, sendo ele dado em função do tipo de madeira utilizada, da classe de carregamento da estrutura e da classe de umidade admitida. O K_{mod} é dado pelo produto das expressões abaixo (Equação 2):

$$k_{mod} = k_{mod1}k_{mod2}k_{mod3}$$

Onde:

k_{mod1} – Leva em conta classe de carregamento e o tipo de material;

k_{mod2} – Leva em conta a classe de umidade e o tipo de material;

k_{mod3} – Leva em conta se a madeira é de primeira ou segunda categoria. Se for segunda categoria admite-se coeficiente 0,80, e no caso de primeira adotar coeficiente 1,0.

A Tabela 06 apresenta valores de K_{mod1} de acordo com classe de carregamento. A Tabela 07 apresenta os valores de K_{mod2} de acordo com a classe de umidade do ambiente.

Tabela 5: Classes de carregamento.

Classes de carregamentos	Período acumulado de tempo de atuação da carga variável de base de uma combinação de ações
Permanente	Vida útil da construção
Longa duração	Mais de 6 meses
Média duração	1 semana a 6 meses
Curta duração	Menos de uma semana
Duração instantânea	Muito curta

Adaptada da NBR 7190 (1997).

Tabela 6: Valores de K_{mod1} .

Classes de carregamentos	Tipos de madeira	
	Madeira serrada Madeira laminada colada Madeira compensada	Madeira recomposta

Permanente	0,60	0,30
Longa duração	0,70	0,45
Média duração	0,80	0,65
Curta duração	0,90	0,90
Duração instantânea	1,10	1,10

Fonte: Adaptada da NBR 7190 (1997).

Tabela 7: Valores de Kmod2.

Classe de umidade	Madeira serrada	Madeira recomposta
	Madeira laminada colada Madeira compensada	
(1) e (2)	1,0	1,0
(3) e (4)	0,8	0,9

Fonte: Adaptada da NBR 7190 (1997).

Logo, considerando que a classe de carregamento atuante na estrutura seja permanente, classe de umidade 2 e material de 1º categoria, temos o seguinte resultado para Kmod (Equação 2):

$$K_{mod1} = 0,60$$

$$K_{mod2} = 1,0$$

$$K_{mod3} = 1,0$$

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

4.2.1.2 Resistência característica

A resistência característica é dada em função da resistência média de um material e um coeficiente de variação, e pode ser calculado pela Equação 03:

$$f_k = f_m(1 - 1,645\delta) \quad (3)$$

Onde:

f_m – Resistência média

δ – Coeficiente de variação

Como não é possível determinar os valores efetivos de variação, a NBR 7190

adota um coeficiente de variação de 18% para esforços normais e de 28% para esforços cisalhantes, resultando nas expressões de resistência característica para esforço normal (Equação 4) e cisalhante (Equação 5), respectivamente:

$$f_k = 0,70 * f_m \quad (4)$$

$$f_k = 0,54 * f_m \quad (5)$$

4.2.1.3 Coeficiente de ponderação

O coeficiente γ_w (Tabela 08) é utilizado para minorar a resistência do material, no qual leva em consideração a variação de resistência do material no mesmo lote e varia de acordo com os esforços atuantes:

Tabela 8: Coeficiente de minoração.

Estado limite	Esforço atuante	Coeficiente γ_w
Último	Decorrentes de tensões de compressão paralela às fibras	1,40
Último	Decorrentes de tensões de tração paralela às fibras	1,80
Último	Decorrentes das tensões de cisalhamento paralelas às fibras	1,80
Utilização	Para estado limite de utilização tem valor básico	1,00

Fonte: Adaptada da NBR 7190 (1997).

Logo, a partir da identificação dos coeficientes, é possível determinar a resistência de dimensionamento, utilizando a Equação (1). Os valores de dimensionamento para a madeira utilizada neste projeto estão apresentados na Tabela 09:

Tabela 9: Valores de resistência de dimensionamento.

Nome comum	Nome científico	ρ_{ap} (12%) Kg/m ³	f_{c0d} Mpa	f_{t0d} Mpa	f_{t90d} Mpa	f_{vd} Mpa	E_{cef} Mpa
<i>Pinus taeda</i>	<i>Pinus taeda</i> L.	645	13,32	19,32	0,84	1,386	7982,4

Fonte: Autor (2022).

4.2.2 Propriedades geométricas

A seguir são apresentadas as propriedades geométricas (Tabela 11) dos elementos estruturais considerados para elaboração do projeto. As sessões consideradas para dimensionamento foram com base nas informações da WFCM (2015) e as dimensões comerciais, conforme estão especificados na Tabela 10.

Tabela 10: Sessões dos elementos estruturais.

Elemento	Sessão	
	Base (b) cm	Altura (h) cm
Viga de piso - caixa d'água	6	12
Viga cobertura - Garagem	6	18
Soleira - dupla	9	9
Soleira - única	9	4,5
Montantes	4,5	9
Montantes duplos	9	9
Montantes triplos	9	13,5

Fonte: Autor (2022).

Tabela 11: Propriedades geométricas dos elementos estruturais.

Propriedades	A (cm ²)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)
Viga de piso - caixa d'água	72	864	216
Viga cobertura – Garagem	108	2925	324
Soleira – dupla	81	546,75	546,75
Soleira – única	40,5	68,34	273,37
Montantes	40,5	273,37	68,34
Montantes duplos	81	546,75	546,75
Montantes triplos	121,5	1845,28	824,12

Fonte: Autor (2022).

4.3 Modelagem da concepção estrutural do sistema *Wood Frame* no *Revit*®.

Após a elaboração da planta baixa, iniciou-se a concepção da modelagem dos painéis montantes do sistema *Wood Frame* utilizando o *Revit*® no modelo estrutural, seguindo as recomendações apresentadas na WFCM 2015, para permitir a integração com o *Robot*® e facilitar a visualização da estrutura e a disposição dos elementos.

As recomendações de modelagem do sistema estrutural da WFCM 2015 são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Limitações do sistema *Wood Frame*.

	Atributo	Limitações
Dimensões de construção		
Construção	Altura média do telhado	10,06 m
	Número de pavimentos	3
	Comprimento e largura do edifício	24,38 m
Sistemas de piso		
Vigas de madeira	Vão de viga	7,92 m
	Espaçamento da viga	0,60 m
Trelças de piso de madeira	Vão de trelça	7,92 m
	Espaçamento da trelça	0,60 m
Sistemas de paredes		
Paredes	Altura de paredes estruturais	6,00 m
	Altura de paredes não estruturais	6,00 m
	Distância entre montantes	0,60 m
Sistema de telhado		
Vigas de madeira	Vão de viga (Projeção horizontal)	7,92 m
	Espaçamento de viga	0,60 m
	Comprimento do beiral	Menor que 0,60 m ou vão da viga / 3
	Inclinação do telhado	45°
Sistema de telhado com vigas de madeira	Vão de viga	7,92 m
	Espaçamento de viga	0,60 m
	Comprimento do beiral	De acordo com fabricante
	Inclinação do telhado	45°
Trelças	Vão de trelça	7,92
	Espaçamento de trelça	0,6
	Comprimento do beiral	Menor L/3 ou 0,60 m
	Inclinação do telhado	45°

Fonte: Adaptada da WFCM (2015).

Inicialmente foi elaborada uma fundação radier que serviu como base para elevação de toda a estrutura. Após a modelagem do radier, iniciou-se a disposição das soleiras inferiores, montantes e soleiras superiores, respectivamente, obedecendo todas as concepções do projeto arquitetônico, como aberturas de portas e janelas.

A dimensão da seção dos elementos escolhida foi de 0,45m x 0,90m, valor comercial e dentro dos quesitos normativos americano da WFCM 2015. Os montantes foram espaçados a 0,60 m, e em alguns casos com espaçamentos menores, para respeitar as aberturas e/ou encontro de paredes.

Em seguida, após concluir a estrutura das paredes, foi realizada a modelagem da cobertura, na qual foram utilizadas tesouras e ripas para composição. As tesouras foram espaçadas seguindo a limitação recomendada na norma, de 60 cm, de modo que estas se fiquem alinhadas com os montantes, já as ripas foram espaçadas em 35 cm.

4.4 Integração Revit® – Robot®.

Após a modelagem da concepção estrutural no *Revit®*, foi realizada a integração entre os *softwares* para análise da estrutura. Com o modelo analítico importado para o *Robot®*, é configurada as propriedades mecânicas do material. As ligações entre os elementos de madeira, chamadas de nós, foram idealizados rotulados, já que elas apresentam deformações. Os nós da base dos montantes foram idealizados como apoio do segundo gênero, visto que esses ficaram fixados na fundação radier. A próxima etapa foi inserir as cargas e realizar o cálculo, para analisar a estrutura.

4.5 Cálculos dos carregamentos

A NBR 7190 diz que na elaboração projeto de estruturas de madeira devem-se considerar carregamentos provenientes de peso próprio, ações variáveis e acidentais na estrutura. Estas ações devem ser combinadas de modo a se considerar os efeitos mais desfavoráveis na estrutura.

As ações permanentes devem ser consideradas em sua totalidade, já as ações variáveis devem ser consideradas as mais desfavoráveis à segurança, os quais devem ser multiplicados por um coeficiente de majoração.

Para a combinação de ações relativas ao estado limite últimos deve-se empregar valores reduzidos de combinação, expresso por $\Psi_0 F_k$, o qual considera a baixa probabilidade de ocorrência de duas ações características de naturezas diferentes agirem simultaneamente. Por isso, em cada combinação de ações, uma ação variável deve ser considerada como principal.

O resultado da combinação pode ser obtido pela Equação 6:

$$F_d = \sum_{i=1}^m F_{Gik} \gamma_{Gi} + Y_Q [F_{Q1k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{0j} F_{Qjk}] \quad (6)$$

Onde F_{Gik} representa o valor das cargas permanentes, F_{Q1k} representa o valor da carga variável tida como variável principal. E os coeficientes γ_{Gi} e Ψ_{0j} são fatores de combinação, podem ser consultados nas Tabelas 13 e 14:

Tabela 13: Fatores de combinação cargas permanentes de grande variabilidade.

Combinações	Para efeitos	
	Desfavoráveis	Favoráveis
Normais	$\gamma_g = 1,40$	$\gamma_g = 0,90$
Especiais ou de construção	$\gamma_g = 1,30$	$\gamma_g = 0,90$
Excepcionais	$\gamma_g = 1,20$	$\gamma_g = 0,90$

Fonte: Adaptado da NBR 7190 (1997).

Tabela 14: Fatores de combinação e utilização.

Ações em estruturas correntes	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Pressão dinâmica do vento	0,5	0,2	0

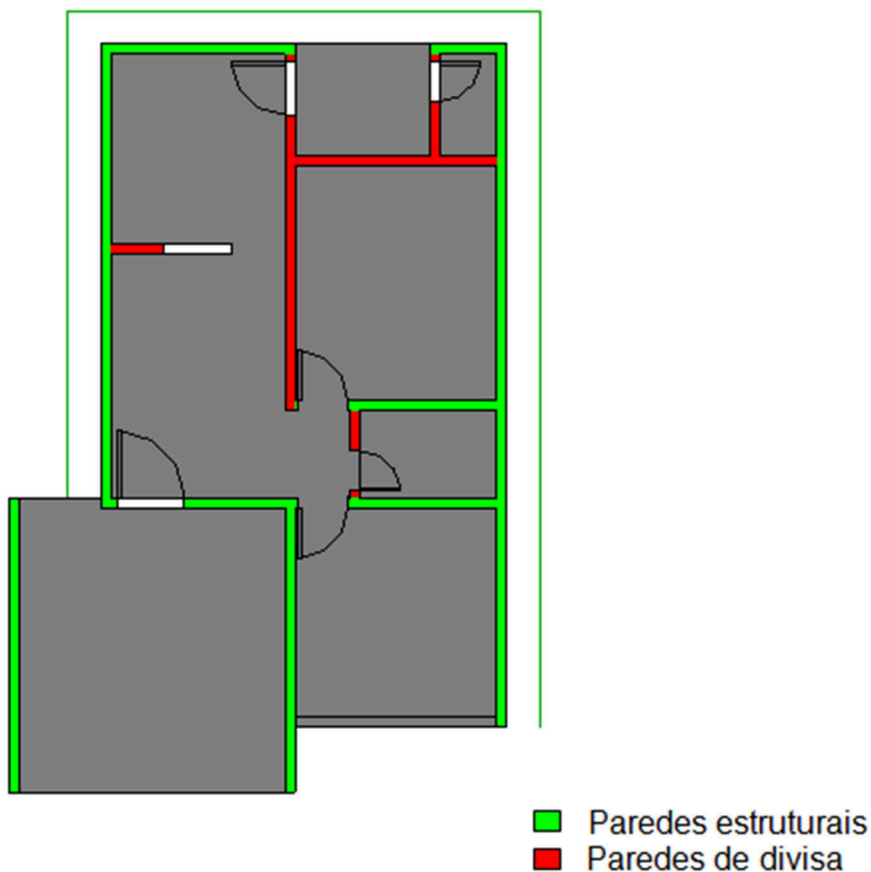
Fonte: Adaptado da NBR 7190 (1997).

Depois de determinar as solicitações que atuam na estrutura idealizada, foi analisada a interação entre os elementos estruturais no modelo analítico ilustrado pelo *Robot®*, a fim de se obter o melhor desempenho dos elementos e da estrutura como um todo, como demonstrado no capítulo a seguir.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 16 estão ilustradas as paredes com função estrutural e as paredes não estruturais, que delimitam os ambientes. As paredes de cor verde são estruturais, as de cor vermelha são paredes de divisa.

Figura 16: Paredes estruturais.



Fonte: Autor (2021).

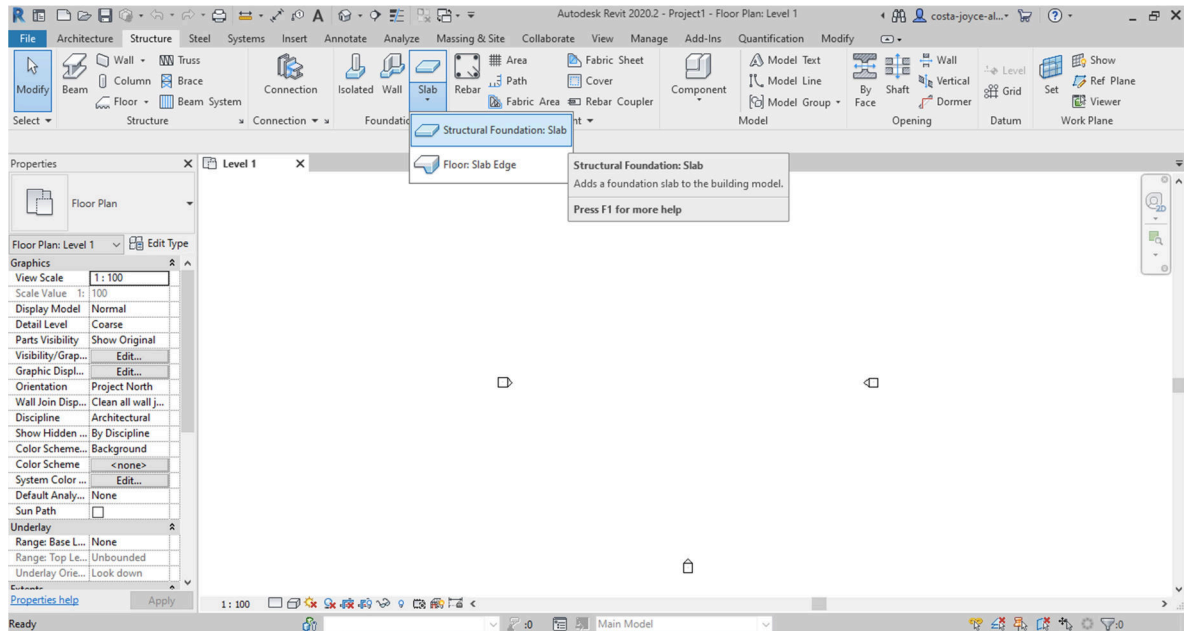
5.1 Modelagem do sistema *Wood Frame* no *Revit*®.

A seguir é apresentado os resultados de modelagem da estrutura no *Revit*®, e como se configurou a disposição dos elementos estruturais nas paredes, seguindo as dimensões recomendadas na WFCM 2015.

Para inserir a fundação radier, que serviu como base para elevação das paredes e disposição dos montantes, seguiu-se o demonstrado na Figura 17. Na aba de estruturas, na seção de fundações, foi criada a fundação do tipo “*slab*”, que

significa laje, na qual não necessita de outros elementos estruturais para apoio da estrutura.

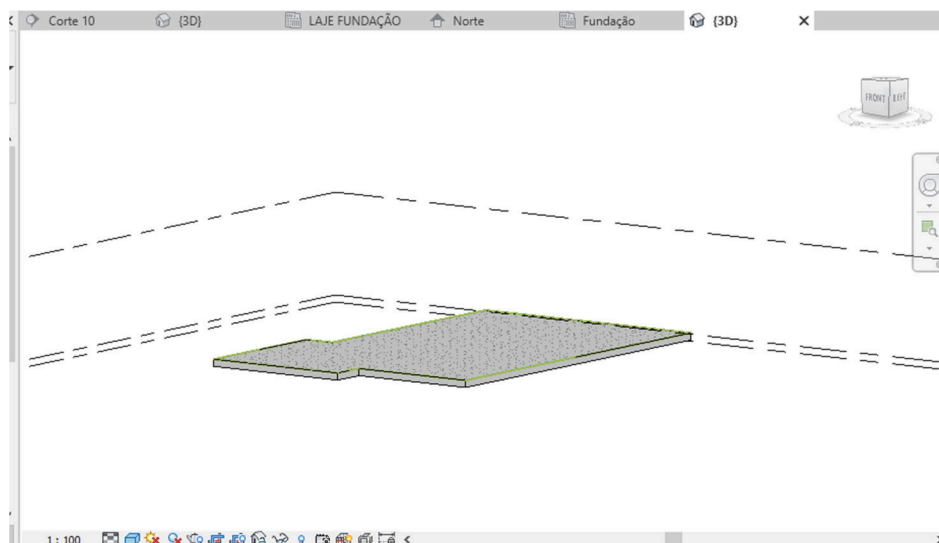
Figura 17 - Fundação radier no Revit®.



Fonte: Autor (2022).

Com o comando ativado, inicia-se a modelagem do perímetro do radier. Para este projeto foram consideradas as dimensões da área apresentada na arquitetura, acrescida de 0,50 m e nas laterais e nos fundos. Obteve-se a seguinte concepção na Figura 18:

Figura 18 - Fundação laje radier



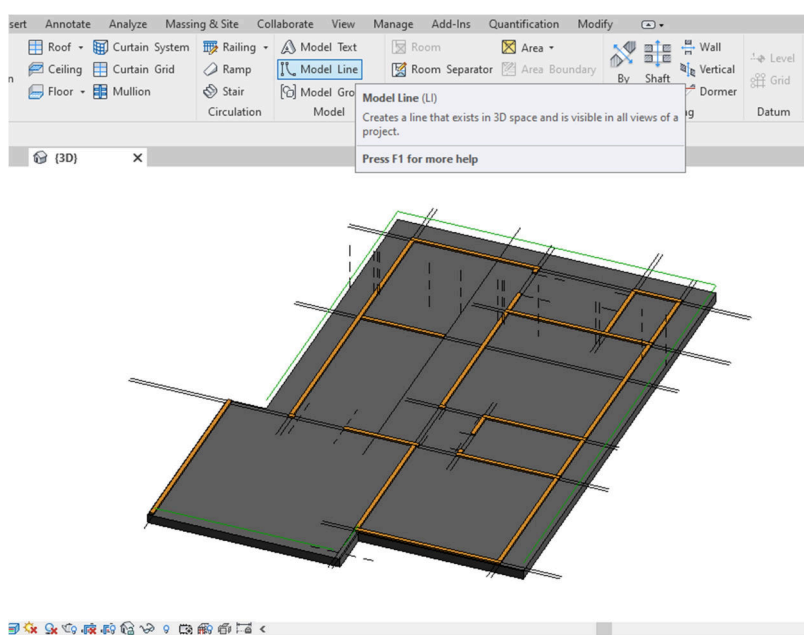
Fonte: Autor (2022).

Dentro da aba de criação da fundação laje (radier) no *Revit®*, já possui laje com altura de 15 cm, e propriedades mecânicas do material utilizado. Tais características podem ser alteradas, e compatibilizadas de acordo com as necessidades de projeto. No entanto, como o objetivo deste trabalho se refere a análise de estrutura de madeira, tais características não afetaram nos resultados, sendo considerado laje de 20 cm. Está serviu de base para disposição dos elementos estruturais no *Revit®*.

Após a conclusão da laje de fundação, iniciou a modelagem da estrutura, seguindo pela locação das soleiras inferiores. O correto posicionamento das soleiras é fundamental nesta etapa do projeto, pois estas servem como base para posicionamento dos montantes e demais elementos da estrutura.

Para isso, foram utilizadas linhas auxiliares (Figura 19) , que estão disponíveis para criação na aba de arquitetura, de modo a facilitar o posicionamento de todos os elementos de eixo a eixo, manualmente. O *Revit®* possui uma extensão da Autodesk chamada *Wood Framing Wall 2020*, que é capaz de projetar estruturas de *Wood Frame* de forma mais precisa e rápida, com atualizações completas, criando painéis de paredes com dimensões automatizadas. No entanto, esta versão está disponível para teste gratuito por poucos dias, sendo necessário código de licença para ativação do produto por período superior.

Figura 19- Linhas auxiliares e soleiras inferiores.



Fonte: Autor (2022).

Logo, os elementos estruturais foram posicionados manualmente, um a um. É importante que os elementos estruturais sejam lançados considerando o seu eixo geométrico para garantir a interação entre os elementos no modelo analítico.

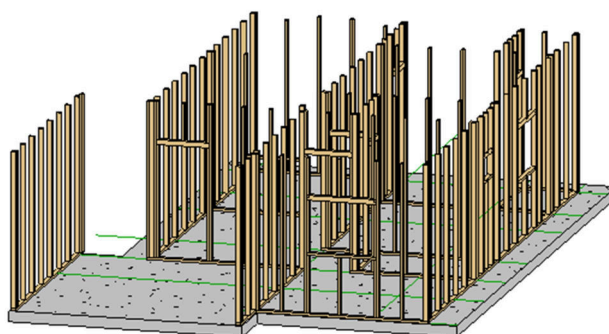
Para criação das soleiras, utilizou-se o comando de vigas, que está disponível na aba de estruturas. Ao inserir o comando de criação de vigas, o *Revit®* já possui uma família de vigas metálicas no programa. Para utilizar a família de madeiras estruturais no *Revit®*, está deve ser carregada, para posterior atualização de propriedades e dimensões que se adequem ao projeto. Logo as soleiras foram dispostas como apresentado na Figura 19.

Após a modelagem das soleiras, iniciou-se a disposição dos montantes. Como especificado anteriormente, recomenda-se que estes sejam afastados em até 60 cm, de acordo com WFCM 2015.

Para criação dos montantes utilizou-se o comando de criação de pilares disponível na aba de estruturas. Configurando os pilares de madeira de acordo com as dimensões de 4,5 cm x 9,0 cm, estes foram lançados seguindo o distanciamento máximo de 60 cm, salvo nos encontros de paredes ou aberturas de portas e janelas, sendo estes deslocados lateralmente, mas nunca ignorados.

Os montantes foram posicionados no eixo das soleiras inferiores e projetados com altura de 2,80 m. Nos encontros de paredes, foram utilizados montantes duplos e triplos, a fim de proporcionar a amarração entre os elementos. A Figura 20 apresenta a configuração dos montantes elaborados no projeto.

Figura 20- Configuração dos montantes.



Fonte: Autor (2022).

Devido o grande número de montantes e a proximidade entre os elementos, notou-se certa dificuldade no lançamento dos montantes. Algumas inconsistências foram notadas no modelo analítico e estes foram ajustados manualmente.

No *Revit®*, é possível configurar para que a representação analítica dos elementos seja realizada de forma manual, automática ou projeção. Na configuração automática, o *Revit®* reconhece por alinhamento do elemento estrutural a ligação entre os perfis. Com isso, inconsistências podem surgir, sendo necessária a verificação constante do modelo analítico em conjunto com a elaboração da estrutura.

Ao fim da modelagem dos montantes, foram inseridas as soleiras superiores em todo o perímetro da casa. Em seguida, foram posicionadas vigas de madeira de seção de 6cm x 12 cm que foram base para apoio do reservatório da residência.

Para lançar a cobertura, foram elaboradas treliças de madeira, de modo a obedecer às recomendações de execução de cobertura para sistema *Wood Frame*. As treliças foram lançadas com espaçamento de 60cm entre elas, de modo a apoiá-las sobre os montantes e não haver excentricidades entre os elementos. Para as treliças foram considerados perfis de 4,5xm x 9,0cm, o mesmo considerado aos montantes.

A seguir, na Figura 21, apresenta a concepção estrutural do modelo da casa *Wood Frame* modelado no *Revit®*.

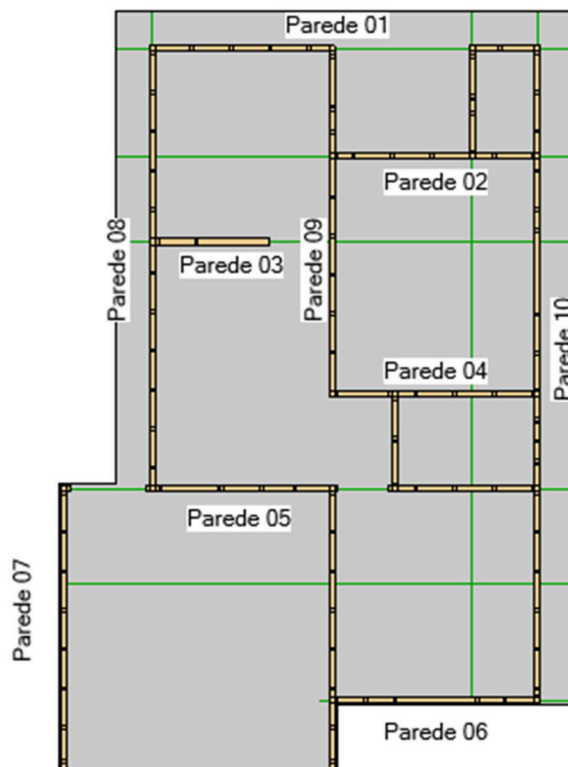
Figura 21- Modelagem 3D do *Wood Frame*.



Fonte: Autor (2022).

As paredes foram numeradas de 01 a 10, de cima para baixo, da esquerda para a direita, conforme é apresentado na Figura 22.

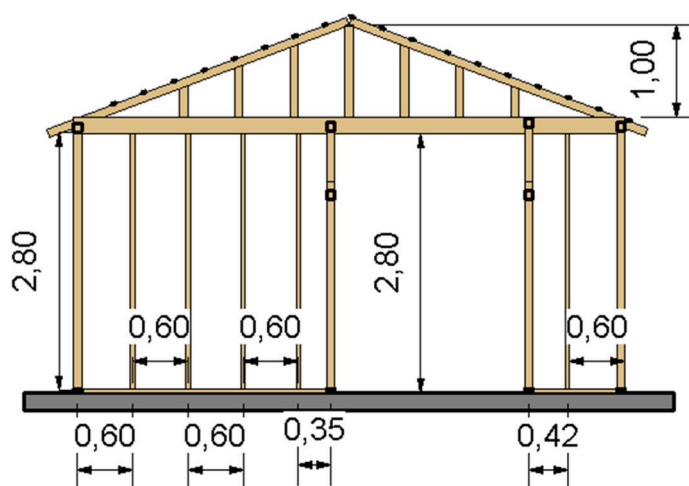
Figura 22: Identificação das paredes.



Fonte: Autor (2022).

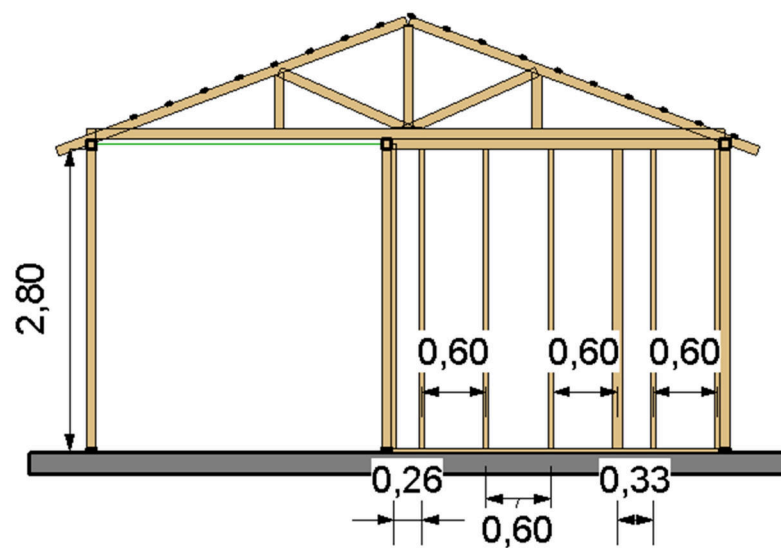
A seguir é possível observar a disposição dos montantes que formam os painéis das paredes. As Figuras de 23 a 32 apresentam a concepção dos painéis parede projetadas para a residência.

Figura 23: Parede 01.



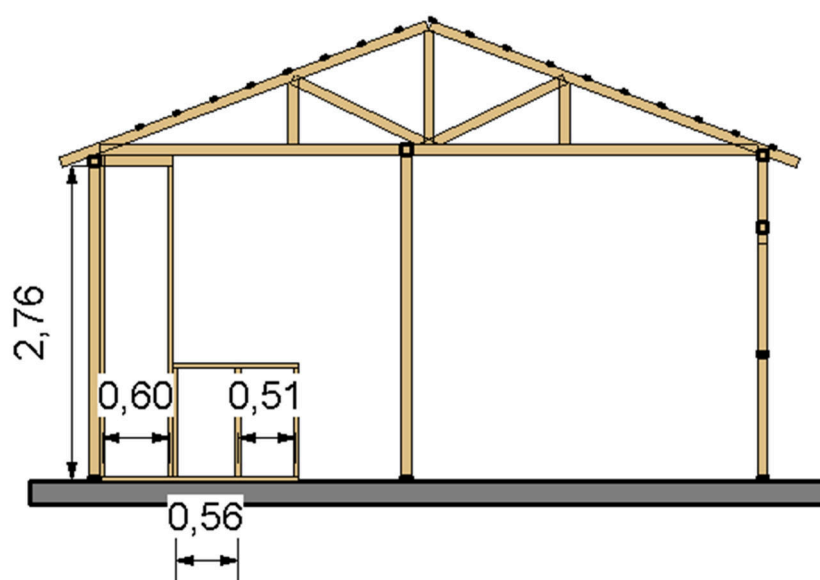
Fonte: Autor (2022).

Figura 24: Parede 02.



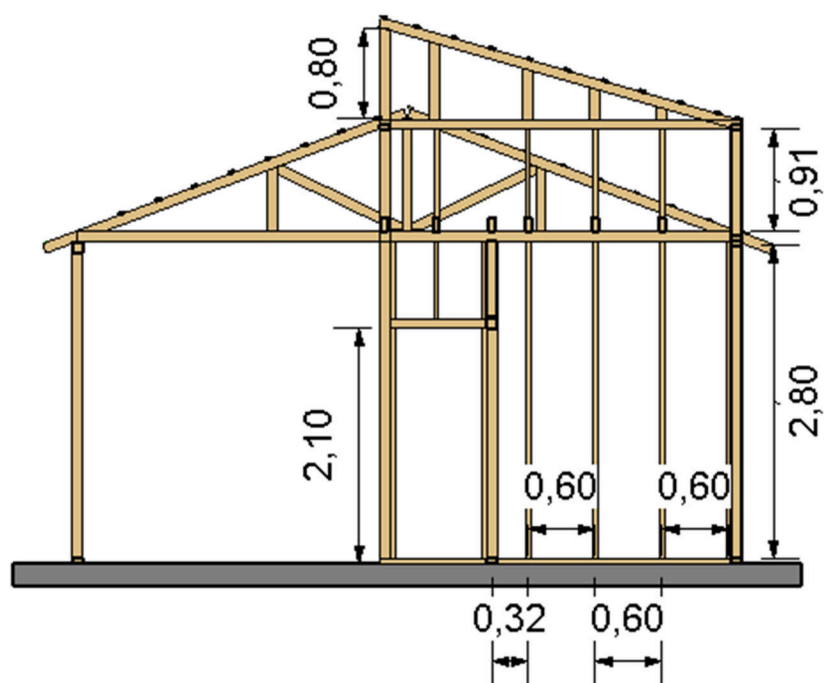
Fonte: Autor (2022).

Figura 25: Parede 03.



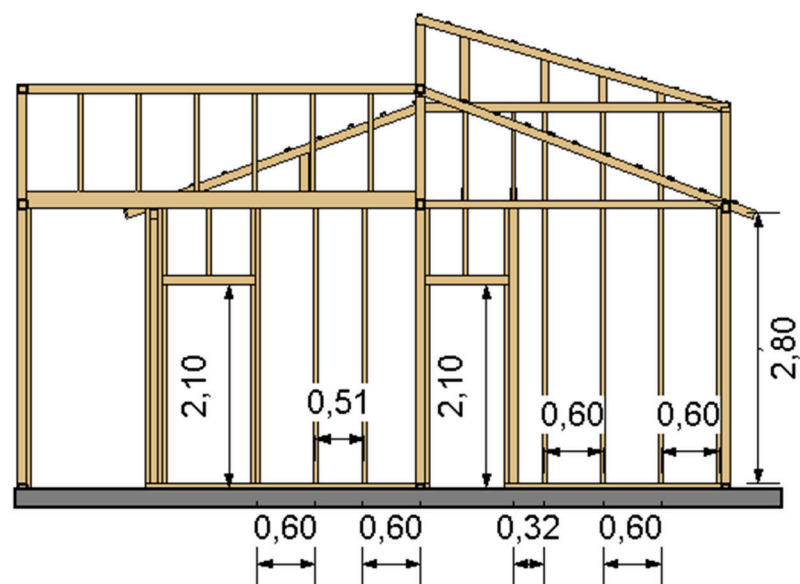
Fonte: Autor (2022).

Figura 26: Parede 04.



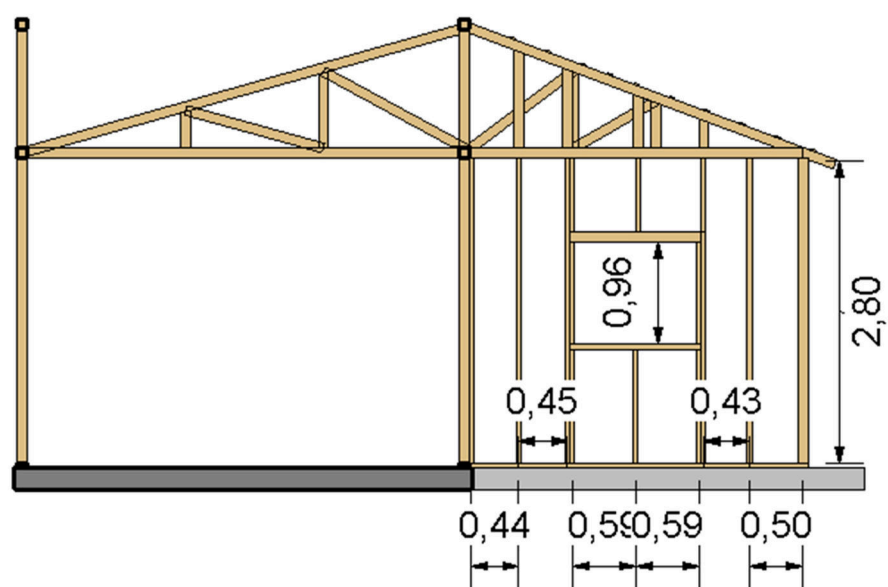
Fonte: Autor (2022).

Figura 27: Parede 05.



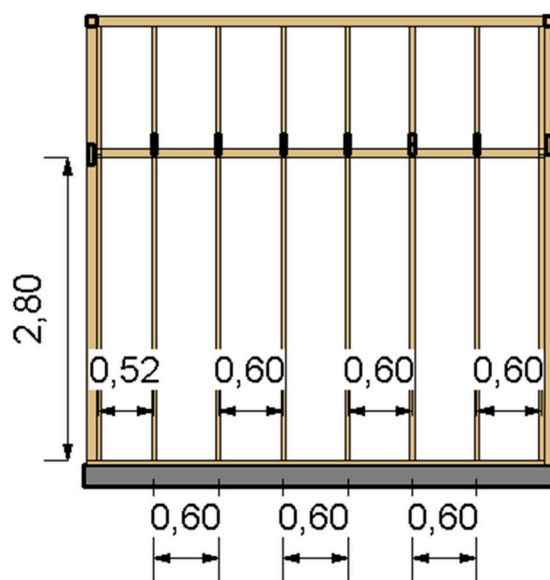
Fonte: Autor (2022).

Figura 28: Parede 06.



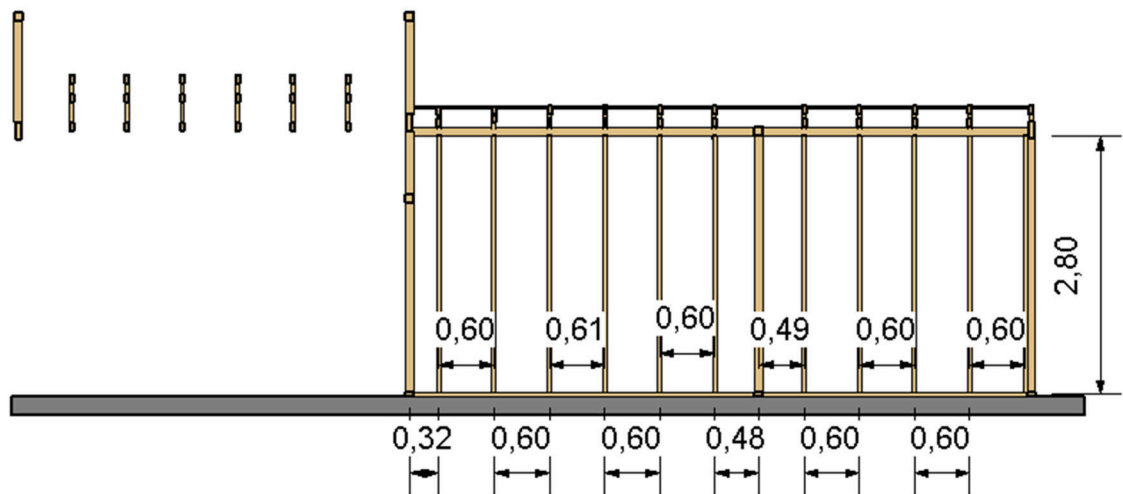
Fonte: Autor (2022).

Figura 29: Parede 07.



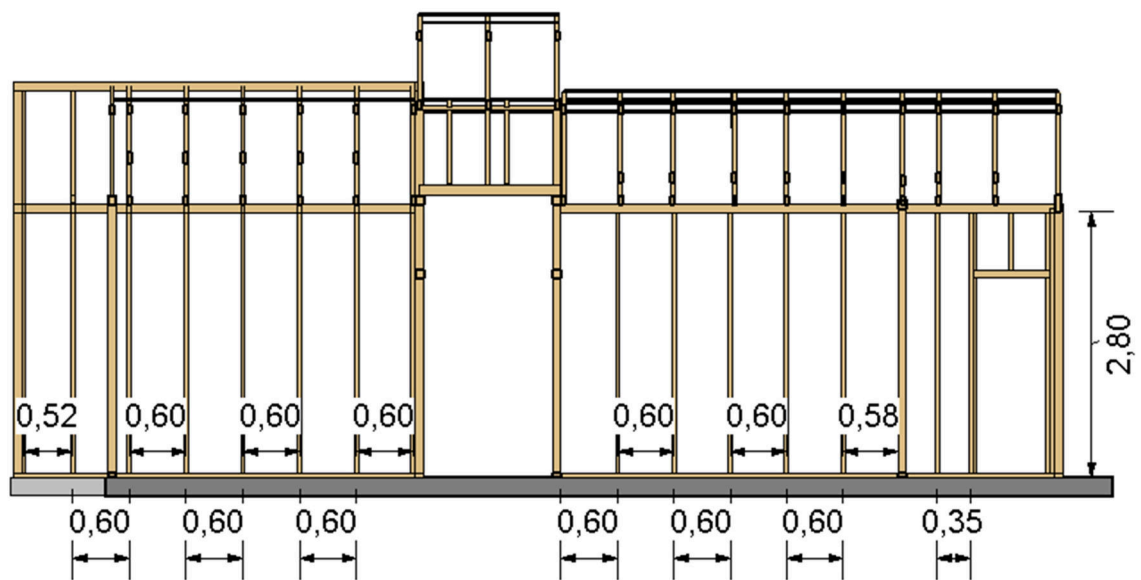
Fonte: Autor (2022).

Figura 30: Parede 08.



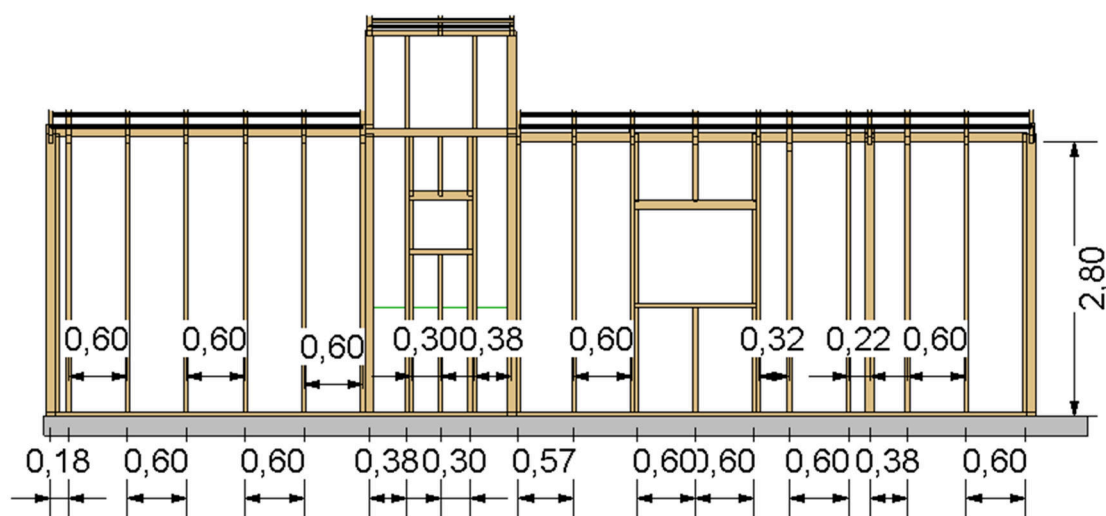
Fonte: Autor (2022).

Figura 31: Parede 09.



Fonte: Autor (2022).

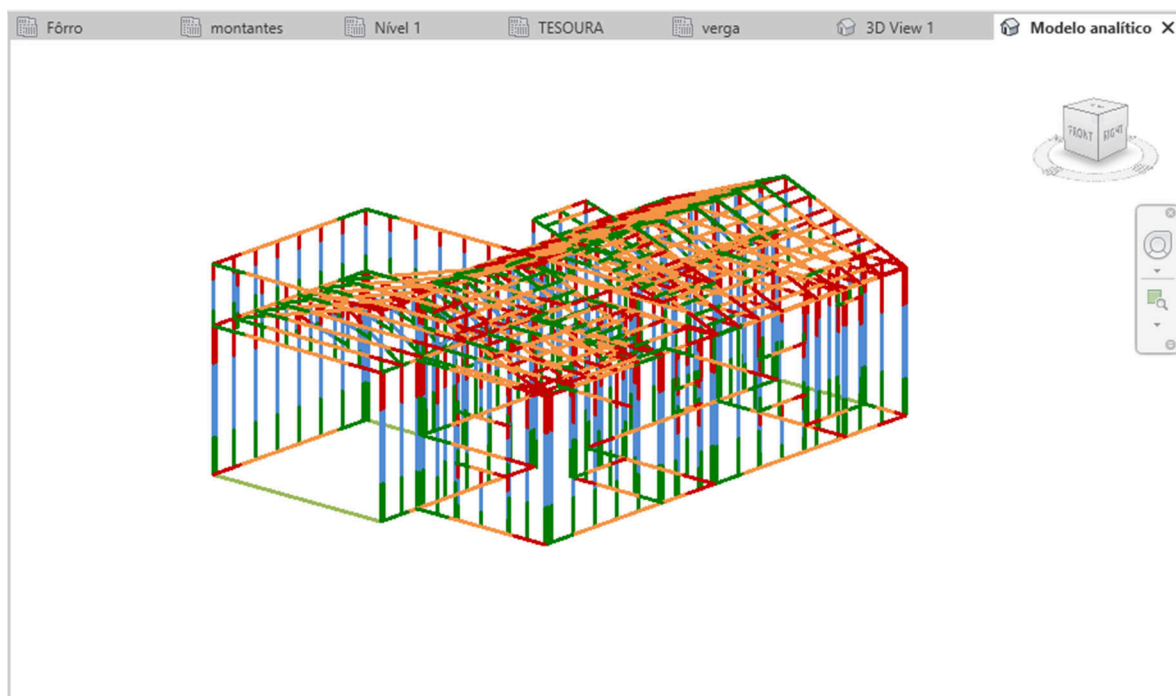
Figura 32: Parede 10.



Fonte: Autor (2022).

Após a conclusão do modelo estrutural, são realizados os ajustes necessários no modelo analítico que é gerado no programa. O modelo analítico é criado junto aos elementos estruturais, quando modelado. A seguir, na Figura 33, é apresentado à concepção do modelo apresentado pelo *Revit®*.

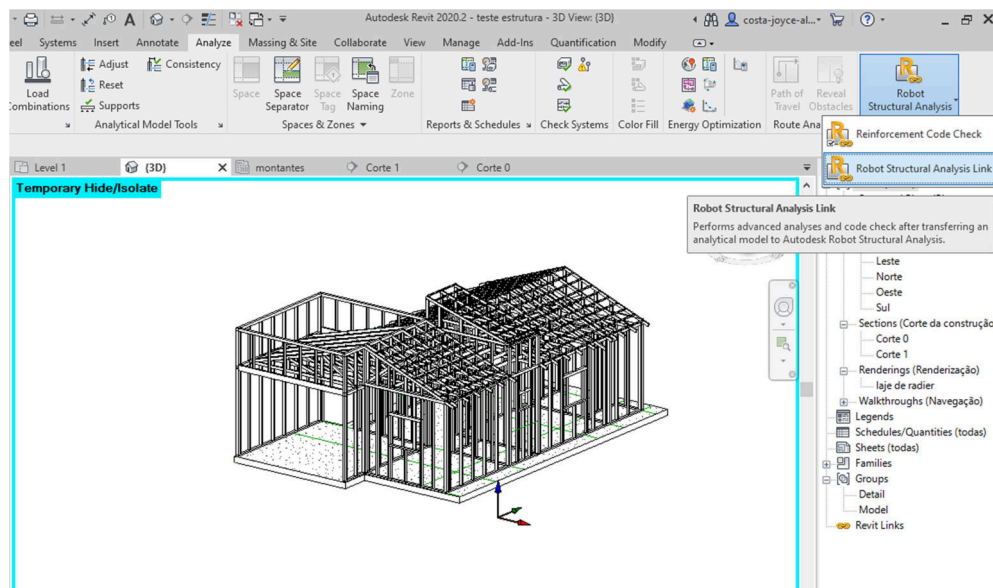
Figura 33- Modelo analítico no *Revit®*.



Fonte: Autor (2022).

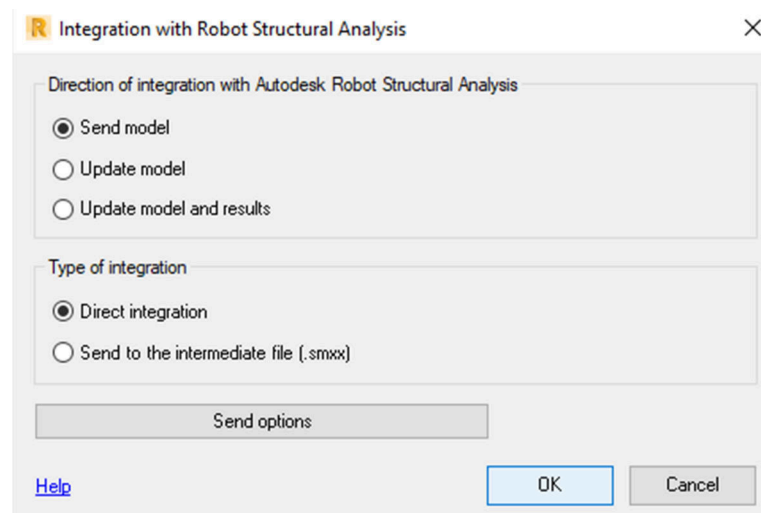
Após a conclusão da modelagem do sistema estrutural, foi realizada a integração com o *Robot®*. Para isso, na aba de análise é indicado link (Figura 34) que integra os *softwares*. Como se segue:

Figura 34 - Link para integração *Revit® –Robot®*.



Fonte: Autor (2022).

Figura 35 - Integração *Robot®*.

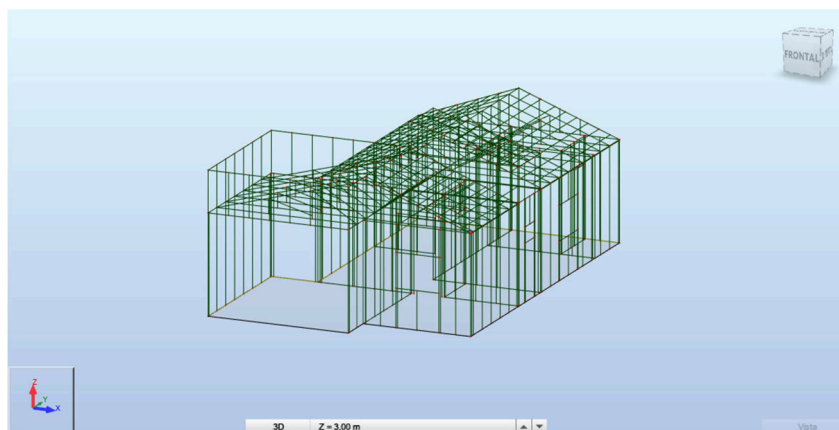


Fonte: Autor (2022).

5.2 Estrutura no Robot®

Após carregamento da estrutura através do link de integração, o modelo analítico é exibido no *Robot®*, como é apresentado na Figura 36:

Figura 36 - Modelo analítico no *Robot®*.

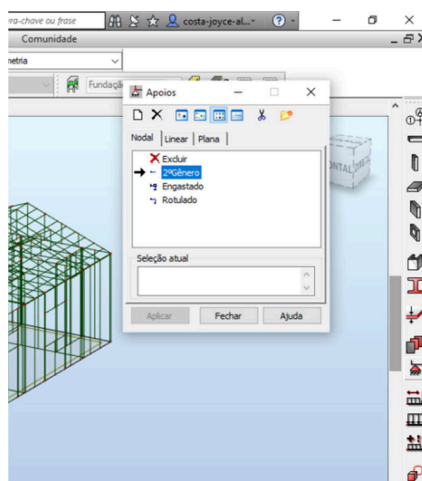


Fonte: Autor (2022).

A Figura 36 apresenta a concepção estrutural do modelo analítico da residência. Note a interseção dos elementos estruturais, identificados por pequenos pontos vermelhos na imagem. A esses pontos denominamos de nós, os quais precisam ser definidos apoios.

A configuração de apoios pode ser identificada na barra de ferramentas, no lado direito do *software*. Com o comando aberto, um novo tipo de nó pode ser criado ou modificar uma categoria existente, conforme é apresentado na Figura 37. Após criar a categoria de segundo gênero e rotulado, os nós foram selecionados e inseridos os apoios.

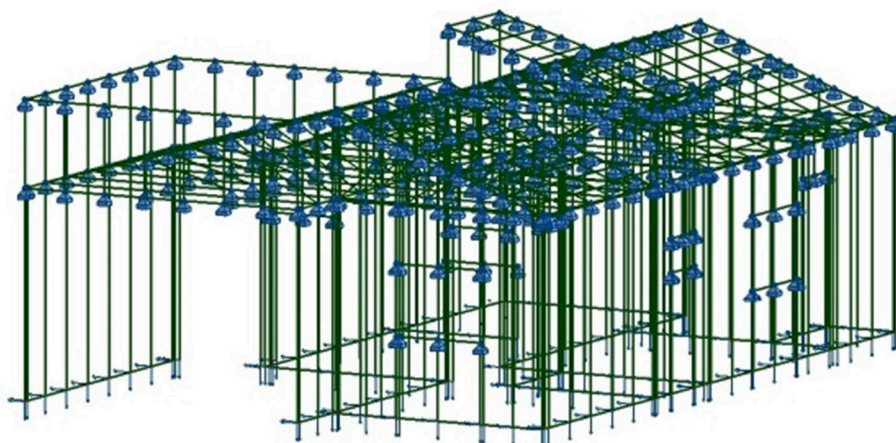
Figura 37 - Criando apoios.



Fonte: Autor (2022).

Para as extremidades dos montantes, que ficarão fixados na laje de fundação os apoios foram definidos como apoio do segundo gênero. Para os demais nós foram considerados como rotulados, devido as deformações da madeira. Os apoios criados estão visíveis na Figura 38.

Figura 38 - Modelo analítico e posição dos nós.



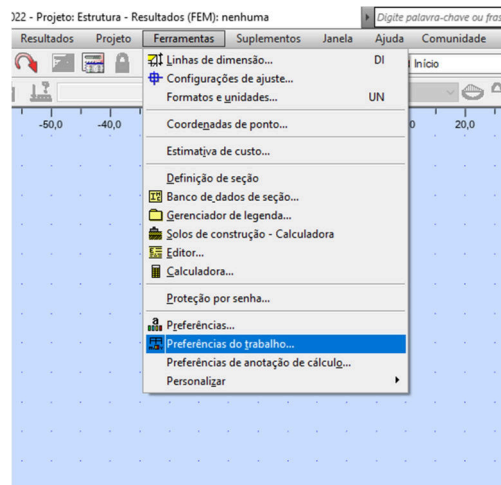
Fonte: Autor (2022).

5.2.1 Configurando as propriedades mecânicas da madeira no *Robot®*.

Após a conclusão do modelo analítico, é hora de inserir as cargas. Mas antes, se fez necessário a configuração de algumas propriedades do material dentro do programa. Tais configurações podem ser feitas dentro da aba de ferramentas, em seguida preferências de trabalho. Nesta aba é possível inserir dados inerentes à classificação de qualquer material, madeira, concreto, aço e etc., inserindo informações de peso específico, resistências, entre outros.

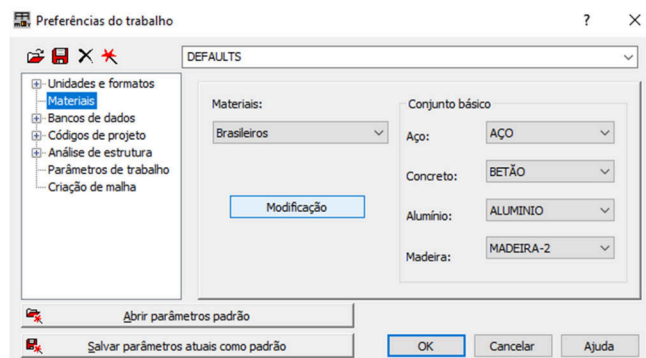
As propriedades mecânicas da madeira foram alteradas conforme as características da madeira *Pinus Taeda*, de acordo com as informações da NBR 7190. Para alterar tais propriedades seguiu a aba de ferramentas, em seguida preferências de trabalho. As preferências de trabalho serão exibidas, e estas podem ser alteradas. Conforme é mostrado nas Figuras 39, 40 e 41.

Figura 39: Configurando material.



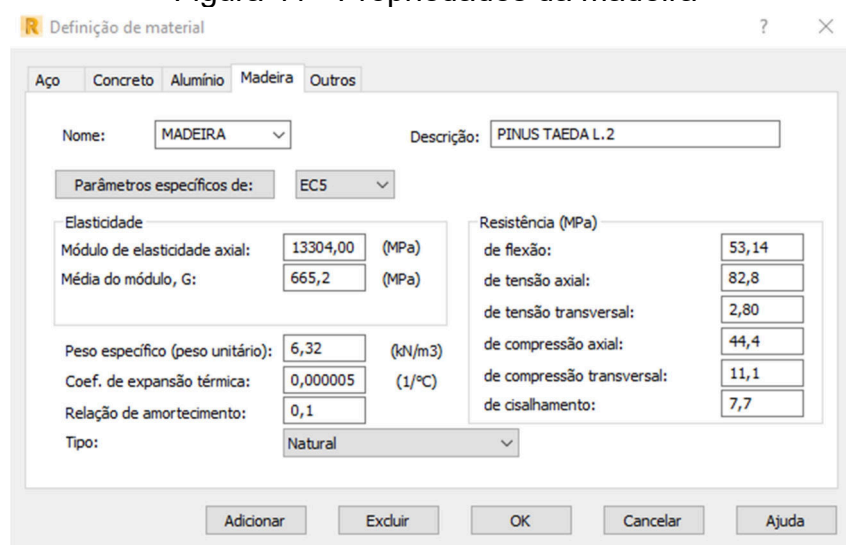
Fonte: Autor (2022).

Figura 40 - Modificando material.



Fonte: Autor (2022).

Figura 41 - Propriedades da madeira



Fonte: Autor (2022).

Com a configuração do material, o peso próprio da estrutura pode ser considerado dentro do próprio software. Os demais carregamentos a serem considerados, devem ser inseridos.

5.2.2 Carregamentos

Para cálculo das estruturas foram consideradas as ações do peso próprio da estrutura, dos revestimentos, da cobertura, da caixa da água e ação do vento, para verificar os deslocamentos na estrutura.

A seguir, é apresentado como esses carregamentos foram considerados.

- Telhas e Ripas:

No projeto idealizado do *Revit*®, foi projetado um total de 167 metros de ripas, com seção de 1,5x5cm. No modelo analítico do *Robot*®, foi observado que as ripas não estavam ligadas as tesouras corretamente. As mesmas estavam gerando apoio somente nas extremidades. Logo para evitar erros na análise estrutural, preferiu-se deletar esses elementos e inserir as cargas provenientes nas tesouras, junto com as telhas. Para determinar a carga proveniente das ripas, é necessário antes determinar o volume total do elemento. O volume total de ripas no projeto é de:

$$V_{\text{ripas}} = 0,015 \times 0,05 \times 167 = 0,125 \text{ m}^3$$

Multiplicando esse volume pelo peso específico da madeira, que é de 645 Kg/m³, temos o peso das ripas:

$$G_{\text{ripas}} = 0,125 \times 645 = 80,63 \text{ Kg}$$

A área da trama, considerando a inclinação do telhado, é de 55,88 m². Para obter o peso da ripa por m² da trama, fazemos a divisão:

$$G_{\text{ripas}} = 1,44 \text{ Kg/m}^2$$

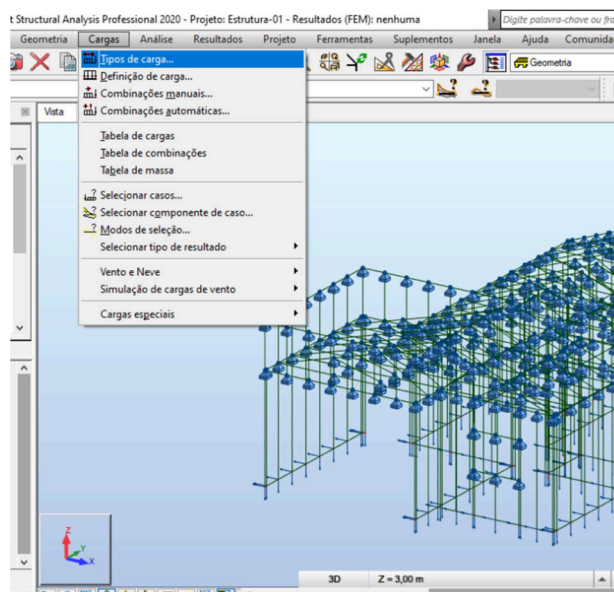
Segundo o catálogo da empresa Top Telha, a telha cerâmica colonial possui um peso de 57,8 Kg/m². Logo temos uma carga de peso próprio de telhas mais ripas de:

$$G_{\text{cobertura}} = 59,24 \text{ Kg/ m}^2$$

Como as tesouras estão espaçadas a 60 cm, temos uma carga linear de 35,544 Kg/m atuando nesses elementos, o que equivale a 0,355 KN/m. Salvo as tesouras de canto, em que recebe contribuição de carga inferior, metade da distancia, portanto de 17,772 Kg/m, o que equivale a 0,177 KN/m.

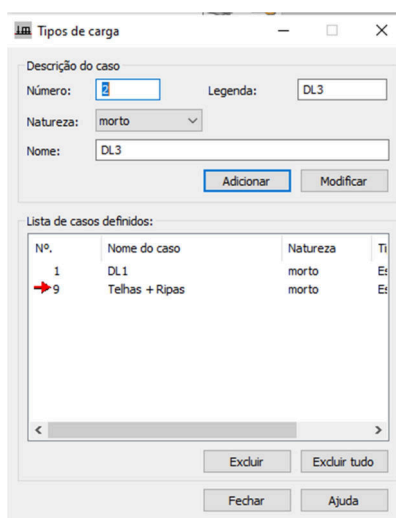
Para criar cargas dentro do *Robot*® (Figura 42 e 43), esta disponível na aba cargas e em seguida tipos de cargas. Tal ferramenta é possível criar os tipos de cargas que atuam na edificação. Como a estrutura foi modelada no *Revit*®, o próprio *software* cria a carga de peso próprio da estrutura, de acordo com as propriedades do material do próprio programa.

Figura 42 - Criando cargas no *Robot*®.



Fonte: Autor (2022).

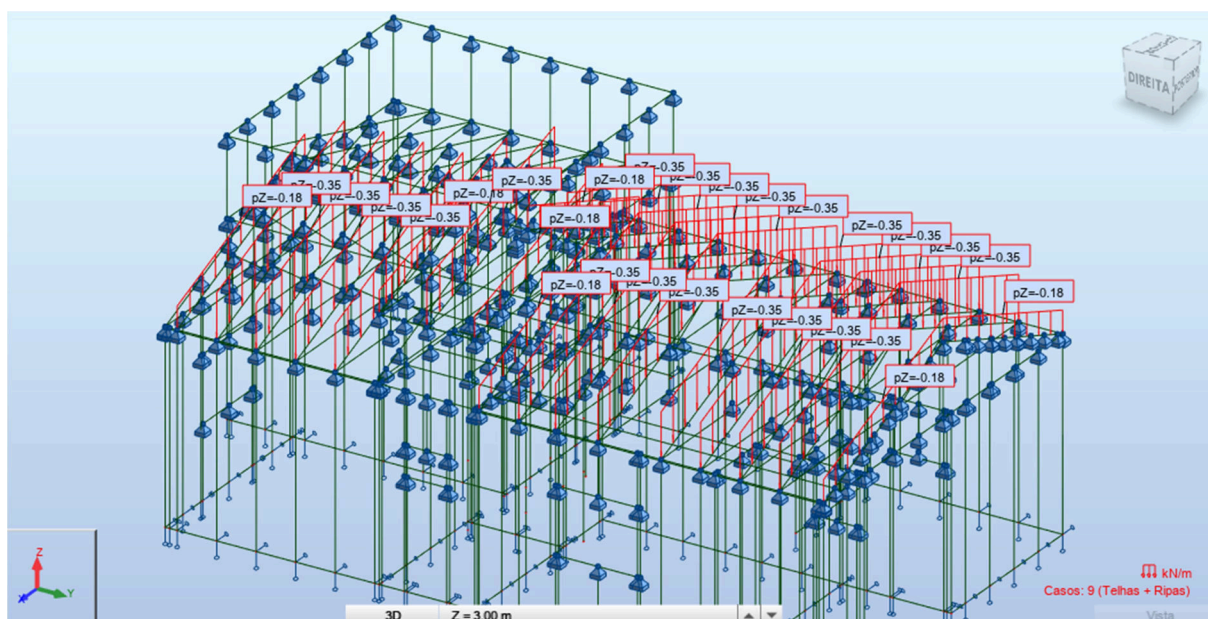
Figura 43 - Criando tipo de cargas no *Robot*®.



Fonte: Autor (2022).

Após a criação dos tipos de cargas, esta deve ser inserida na estrutura, definindo o valor calculado anteriormente para as telhas e ripas. As cargas podem ser inseridas como carga concentrada, carregamento linear ou em superfície. Como o carregamento das ripas e telhas determinadas em KN/m, utilizaremos o carregamento linear a ser aplicado na estrutura das tesouras. A Figura 44 representa como essas cargas foram distribuídas:

Figura 44: Ações das telhas e ripas.



Fonte: Autor (2022).

- Cobertura da garagem:

Para cobertura da garagem foi considerado a utilização da telha fibrocimento, visto que a cobertura desse cômodo fica isolada por platibanda, sendo a telha fibrocimento mais leve.

Para cálculo da carga da telha de fibrocimento, foi considerado o valor de peso de 16 Kg/m² para telha de 5mm, disponível no catalogo do fornecedor Brasilit. Como as tesouras estão espaçadas em 0,60 cm, temos uma carga linear de 9,6Kg/m, o que equivale a 0,096KN/m.

- Revestimentos:

A residência será revestida com placas de OSB de 11,1 mm e 18,3 mm. De acordo com o fabricante LP Building Products, uma placa de 11,1 mm com 1,2x3,00 m, possui um peso de 25,60 Kg, o que resulta em um total de 7,11 Kg/m². A placa

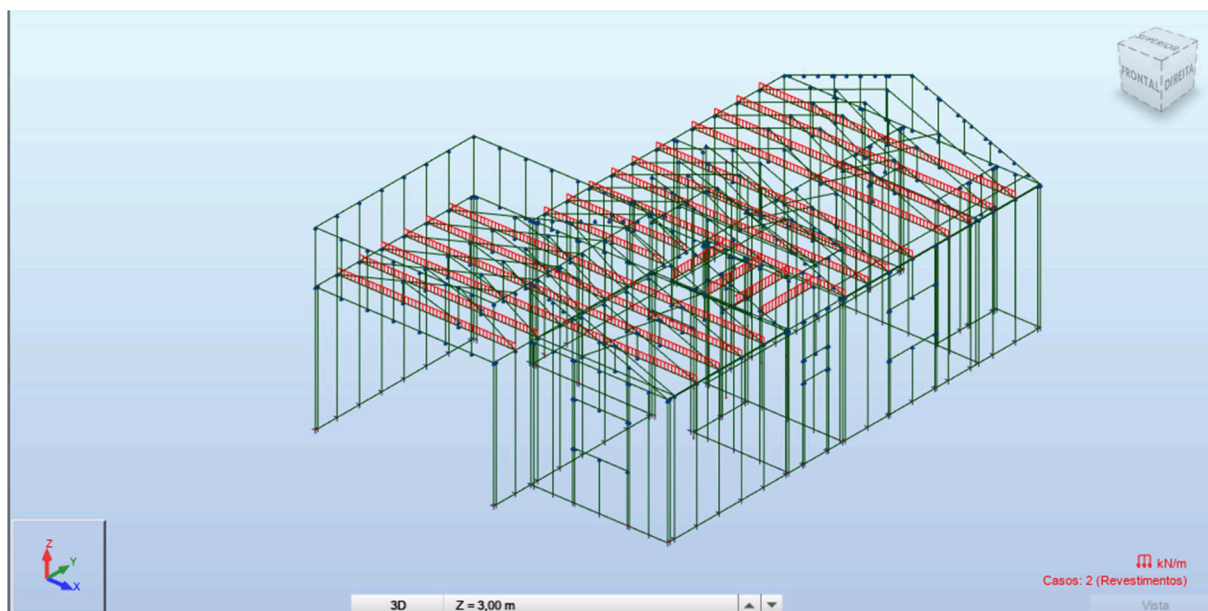
de 18,3 mm com 1,20 x 2,40 m, possui um peso de 33,70 Kg, o que resulta em um total de 11,70 Kg/m².

As placas de 11,1 mm serão utilizadas para revestir todo o forro da casa, salvo o banheiro o qual será empregado as placas de 18,3 mm devido às ações do reservatório.

Para isolamento termo acústico, será utilizado lã de vidro. De acordo com especificações de fornecedores, o material possui um peso total de 0,5 Kg/m². Logo, teremos uma carga de 12,2 Kg/m² atuando nas vigas do banheiro e uma carga de 7,61 Kg/m² nos demais cômodos, o que equivalem a 0,122 KN/m² e 0,0761 KN/m² respectivamente. Como as tesouras e vigas estão espaçadas em 0,60 m, temos uma carga linear de 0,0732 KN/m e 0,0456 KN/m.

Esses revestimentos serão aplicados à base inferior das treliças, gerando assim cargas verticais nos tirantes das tesouras. No banheiro, as cargas do revestimento foram aplicadas nas vigas. A Figura 45 apresenta como essas cargas foram distribuídas:

Figura 45: Ações dos revestimentos.



Fonte: Autor (2022).

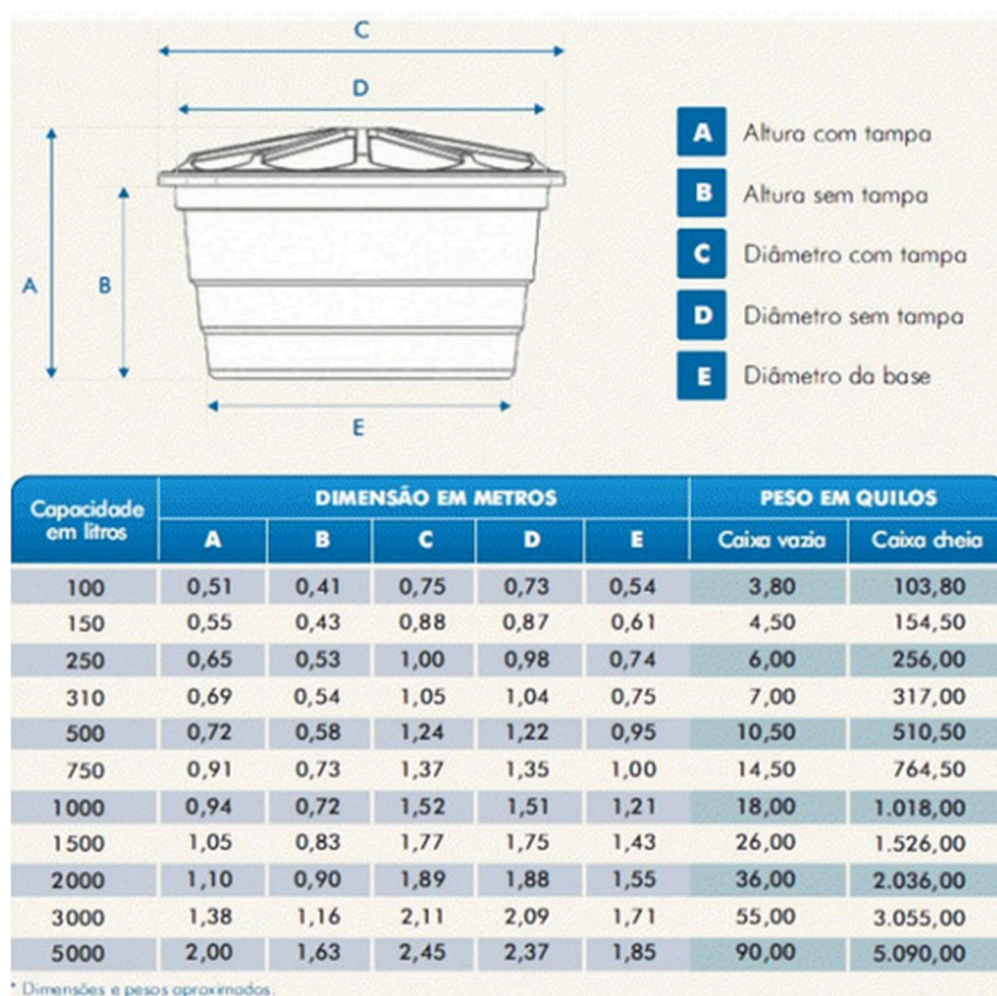
- Reservatório:

Para determinar o peso do reservatório, foi antes estimado o volume útil para abastecer a casa por dois dias. Visto que a casa tem 2 quartos, considerando um número de duas pessoas por quarto, temos um total de 4 pessoas na residência.

Adotando um consumo médio de 120 l/dia por pessoa, temos um consumo de total de 480 l/dia. Considerando que o reservatório seja capaz de abastecer a casa por no mínimo dois dias, considera-se a utilização de um reservatório de 1000 l.

O diâmetro do reservatório de 1000 L é de 1,52 m, conforme é apresentado na Figura 46, sendo este maior que o espaço destinado a inserir o reservatório. Logo, para garantir o fornecimento de água a família, será considerado a utilização de 2 reservatórios de 500 L.

Figura 46: Características do reservatório.



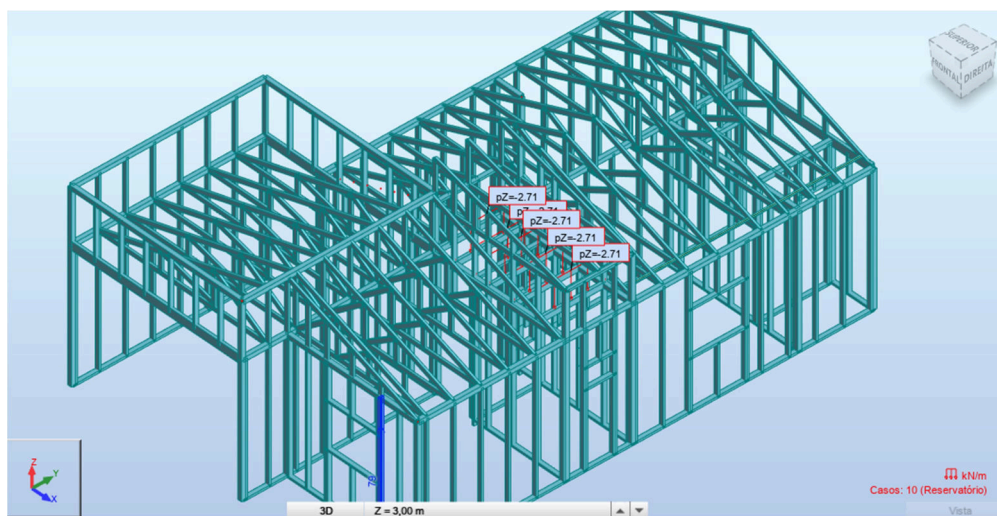
Fonte: Fortlev (2020).

Considerando as informações do fabricante Fortlev, o reservatório de 500 l possui um diâmetro de 1,20m, vazio pesa aproximadamente 10,50 Kg. Considerando o peso específico da água, temos um peso total da caixa cheia, de 510,50 Kg. De acordo com o diâmetro da caixa, temos uma área de base de 1,13 m².

Dividindo o peso da caixa cheia pela área de contato, temos 451,76 Kg/m², aproximadamente 4,52 KN/m², cada reservatório.

O reservatório estará apoiado sobre vigas, as quais estão espaçadas a 60 cm. Desse modo, temos uma carga linear de 2,71 KN/m. As vigas laterais recebem uma carga menor, devido à área de influência, sendo, portanto essa carga de 1,356 KN/m. Conforme é apresentado na Figura 47:

Figura 47: Ações do reservatório.



Fonte: Autor (2021).

- Carga de utilização:

A NBR 6120, sobre cargas para cálculo em estruturas fixa cargas variáveis de utilização de acordo com o tipo e edificação e/ou cômodo. Na qual apresenta os seguintes valores para ação variável de edifícios residenciais.

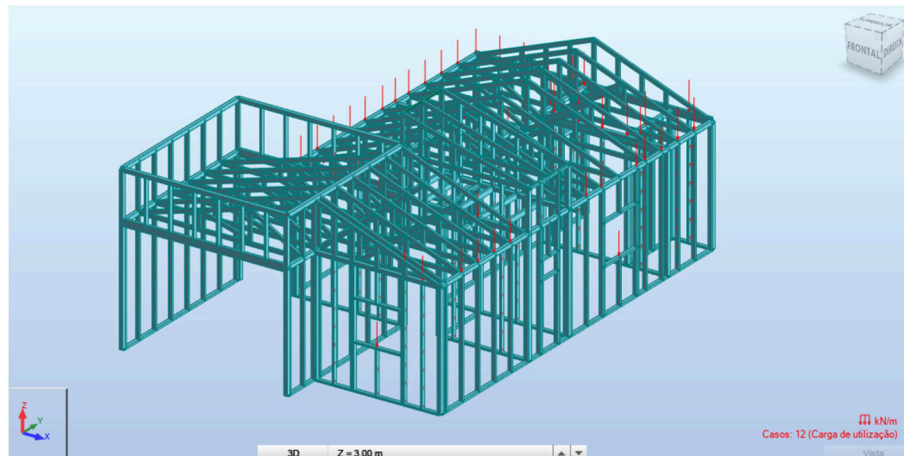
Tabela 15 - Cargas variáveis.

Cômodo	KN/m ²
Dormitórios, sala, copa, cozinha e banheiro.	1,5
Despensa, área de serviço e lavanderia.	2

Fonte: NBR 6120.

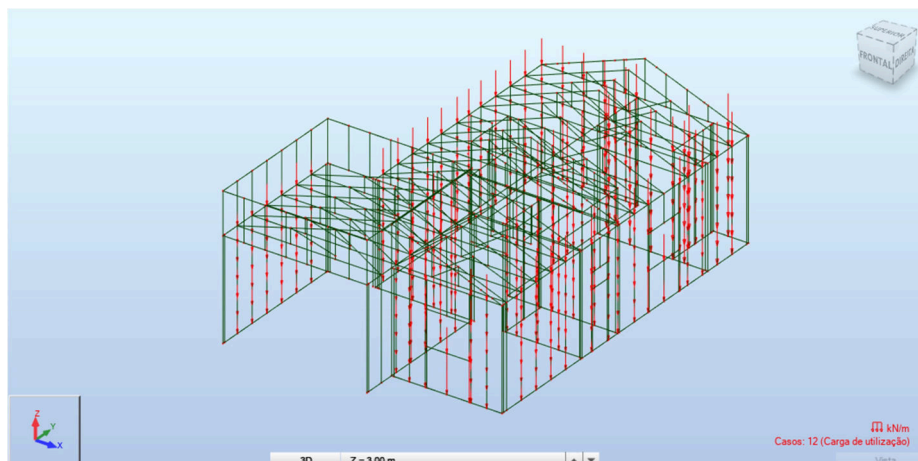
Como os montantes estão afastados de 0,60 m, consideramos as cargas atuantes linearmente nos montantes de 0,90 KN/m e 1,20KN/m, respectivamente. A distribuição desse carregamento está visível na Figura 48 e 49.

Figura 48 - Cargas de utilização.



Fonte: Autor (2022).

Figura 49: Carga de utilização nos montantes.



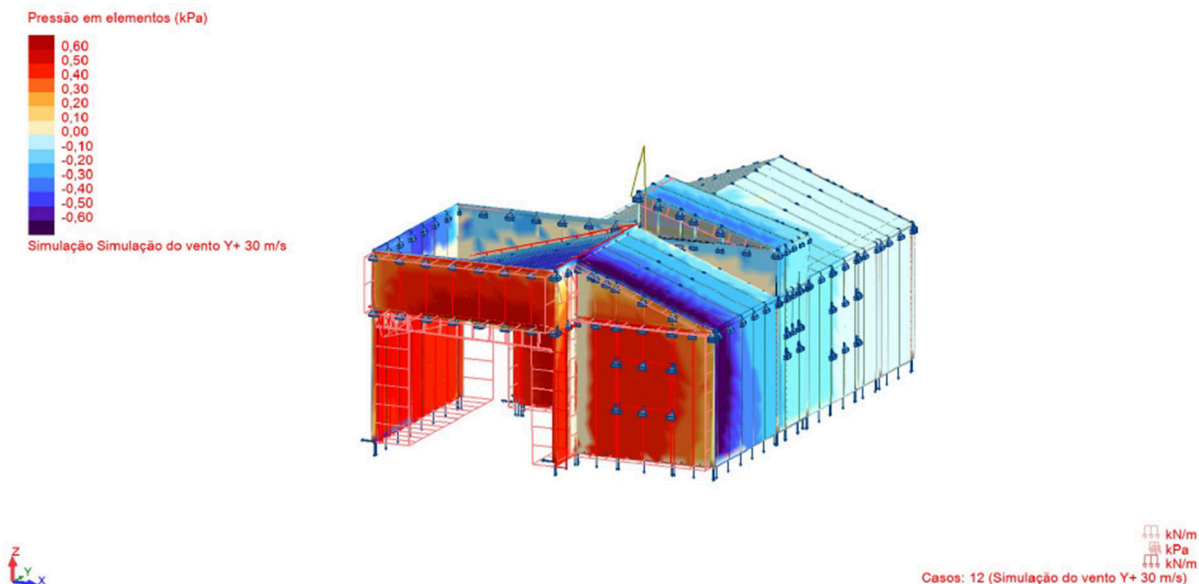
Fonte: Autor (2022).

- Ação do vento:

Um grande diferencial do *Robot*® é permitir a realização da simulação do vento na estrutura, o qual apresenta diagrama das pressões atuando na estrutura. Ele permitir realizar a simulação em diferentes direções. Para realizar a simulação, foram colocados revestimentos na estrutura, a fim de apresentar essas solicitações.

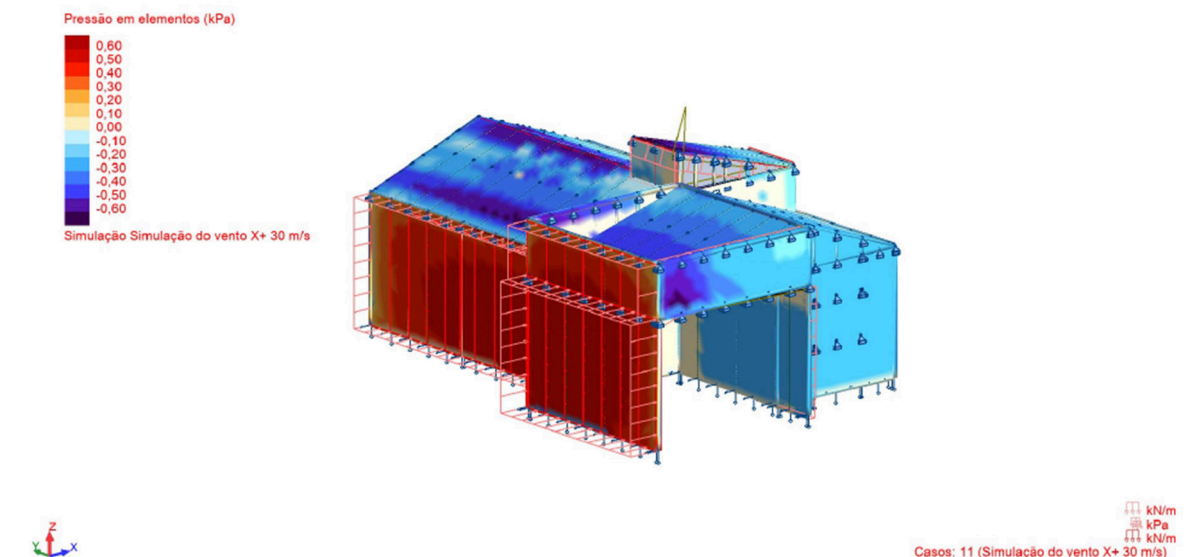
A seguir é apresentada a simulação do vento nas direções x (Figura 51) e y (Figura 50) da estrutura.

Figura 50: Vento na direção y.



Fonte: Autor (2022).

Figura 51: Vento na direção x.



Fonte: Autor (2022).

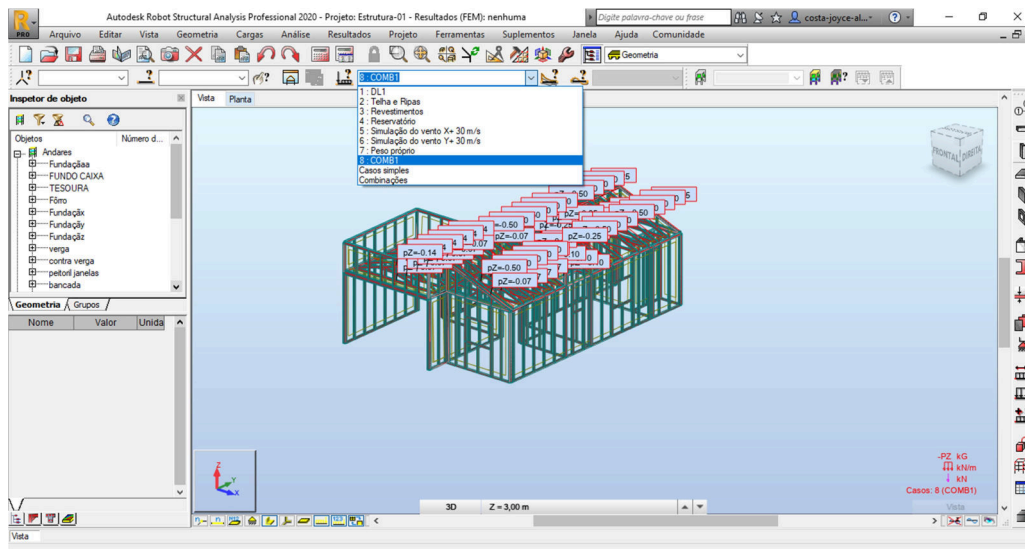
As regiões que apresentam cor alaranjada são regiões submetidas a esforços de pressão que agem de fora para dentro do modelo. As regiões que apresentam cor violeta estão submetidas à sucção, ou seja, existem forças agindo de dentro para fora da estrutura.

Após criar todas as cargas e aplica-las na estrutura, foi realizada a

combinação dos carregamentos, de modo a obter o caso mais crítico. A seguir é apresentado como a ação é executada dentro do *software*:

Na aba apresentada na Figura 52, é possível visualizar todos os carregamentos criados e visualiza-los individualmente.

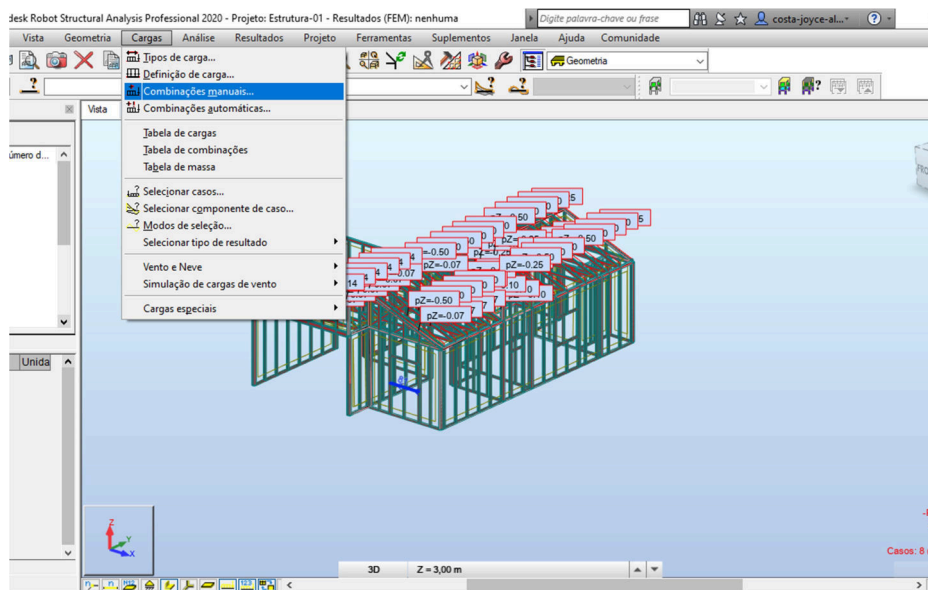
Figura 52: Carregamentos.



Fonte: Autor (2022).

Na aba de cargas (Figura 53) apresenta a opção de combinações manuais ou automáticas. Na geração de combinações manuais, consigo combinar as cargas e inserir os fatores de majoração e os coeficientes de combinação, conforme é sugerido na NBR 7190 (1997).

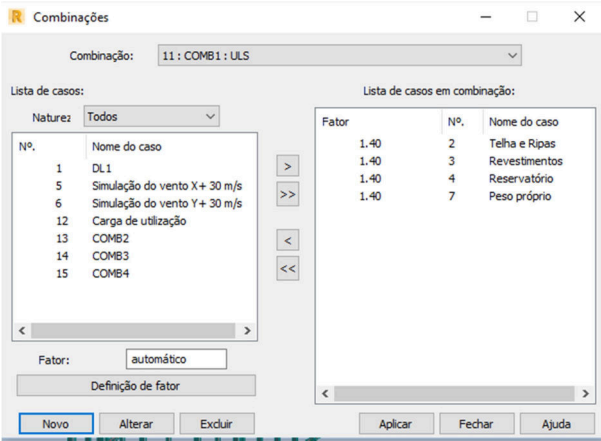
Figura 53: Combinações das ações.



Fonte: Autor (2022).

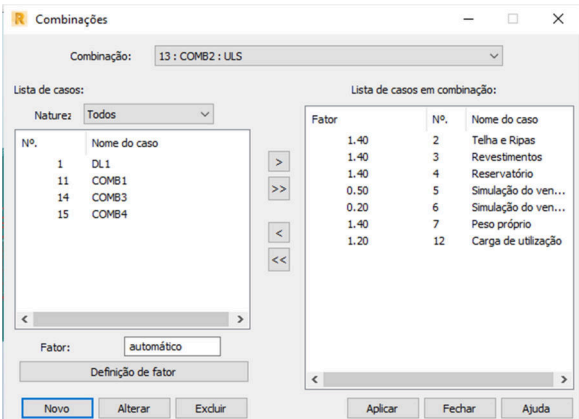
As Figuras 54 a 57 apresentam as combinações de cargas realizadas e os coeficientes de majoração considerados.

Figura 54: Combinações cargas 01.



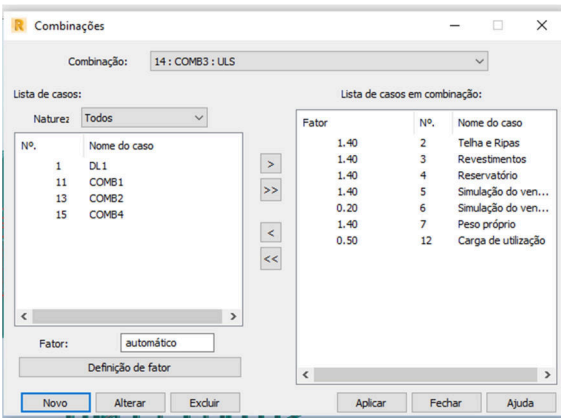
Fonte: Autor (2022).

Figura 55: Combinação de cargas 02.



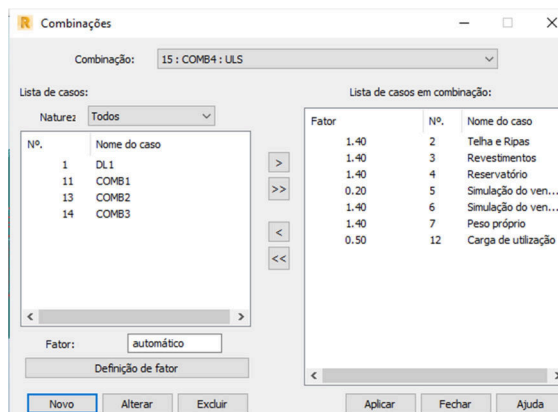
Fonte: Autor (2022).

Figura 56 : Combinação de carga 03.



Fonte: Autor (2022).

Figura 57: Combinação de cargas 04.



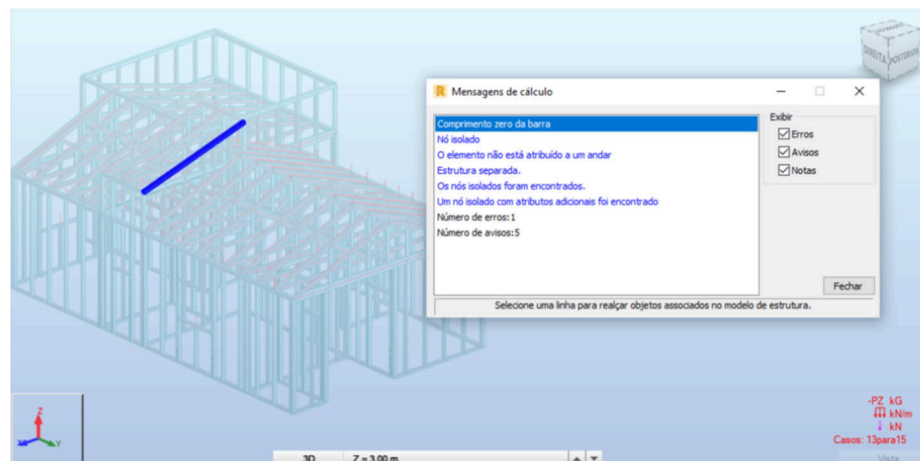
Fonte: Autor (2022).

As ações foram combinadas de quatro modos, considerando apenas as ações de peso próprio, considerando o peso próprio e a carga de utilização como variável principal, considerando o peso próprio e a força do vento em x como ação variável principal e por ultimo considerando o peso próprio e a ação do vento em y como variavel principal. Os fatores considerados, são apresentados nas Figuras 53 a 56, conforme apresentado anteriormente, para as cargas permanentes e a variável principal o fator foi de 1,40, e para as ações variáveis o fator de combinação (Ψ_{0j}) considerado foi de 0,5, e para as demais fator de 0,2.

Após a criação das combinações das ações, foi realizado o cálculo da estrutura, para verificar se existem erros na representação do sistema. Quando a estrutura é calculada surgem mensagens (Figura 58) que informam se há erros na estrutura ou avisos. Se erros forem identificados, é necessário retornar ao modelo e corrigi-los.

Ao calcular a estrutura surgiu mensagem de elemento com comprimento zero, sendo necessário retornar ao modelo e corrigir o problema. Além do erro apresentado durante a mensagem de cálculo, também foi gerado um aviso de estrutura separada, o que indica a falta de interação entre alguns elementos. Logo, é necessário corrigir.

Figura 58 - Mensagem de cálculo.



Fonte: Autor (2022).

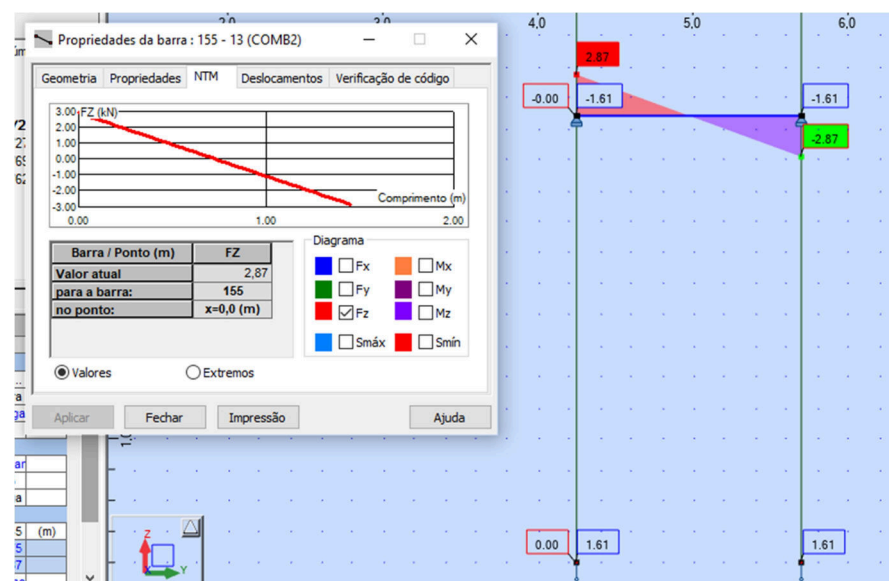
5.3 Dimensionamento

5.3.1 Análises das vigas de madeira

A verificação de resistência das peças conforme os resultados fornecidos pelo *Robot*® foram verificados para as peças mais solicitadas, de acordo com NBR 7190. A seguir são apresentadas as verificações:

A viga de madeira que serviu de apoio para o reservatório, é representada abaixo. De acordo com o resultado do *Robot*®, a viga de seção 6 x 12 cm foi aprovada nos cálculos de dimensionamento, conforme é apresentado nas propriedades do elemento na Figura 59.

Figura 59 - Diagrama esforço cortante na viga de secção 6x12.

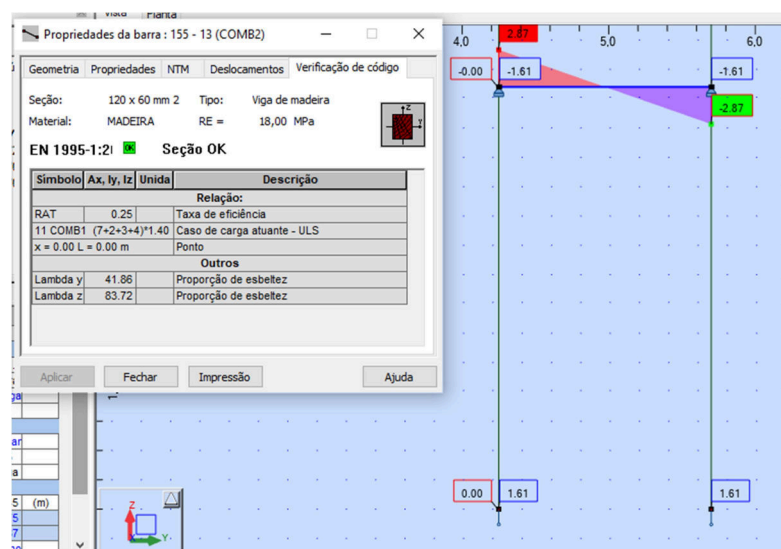


Fonte: Autor (2022).

Na aba de propriedades da barra, é possível ver a aprovação do elemento, e qual a combinação de carregamento que gerou maior esforço para dimensionamento. Além disso, é possível verificar a norma que o *software* utilizou para cálculo das ações. Estas informações podem ser verificadas na Figura 60.

A norma selecionada foi a EN 1995-1:2004/A2:2014, norma europeia que mais se assemelha a normativas brasileiras para dimensionamento de madeiras. Posteriormente será apresentada a ferramenta do *software* que apresenta lista de todas as barras, assim como as considerações de cálculo.

Figura 60 - Propriedades da barra 155.



Fonte: Autor (2022).

A fim de verificar o resultado da seção da viga aprovada pelo programa, foi realizada verificação segundo a NBR 7190:

A Tabela 16 apresenta os esforços de dimensionamento atuantes na viga, retirados da *Robot®*:

Tabela 16 - Esforços de dimensionamento atuantes na viga

Esforços de dimensionamento	unidade	Valor
Momento fletor máx	KN.m	0,69
Esforço cortante máx	KN	2,87
Reação de apoio	KN	4,53

Fonte: Autor (2022).

Para barras submetidas à flexão simples, a verificação deve ser feita conforme as equações (3.8.1.5) e (3.8.1.6),

Aplicando os valores da Tabela 16 na equação (3.8.1.10):

$$\sigma_{Md} = \frac{6M_d}{b * h^2} = \frac{6 * 100 * 0,69}{6 * 12^2} = 0,479 \text{ KN/cm}^2$$

Verificando conforme as equações (3.8.1.5) e (3.8.1.6):

$$\sigma_{Md} < f_{cd}$$

$$\sigma_{Md} < f_{td}$$

Os valores de resistência à compressão e tração de dimensionamento estão expressos na Tabela 09, e correspondem a 1,332 KN/cm² e 1,932 KN/cm², respectivamente. Logo a condição imposta pelas equações é atendida.

Para verificação de compressão normal as fibras, a condição de segurança é expressa pela Equação (3.8.1.3):

$$\sigma_{c90d} < f_{c90d}$$

A resistência à compressão de dimensionamento normal à fibra (Equação 3.8.1.30) e o esforço solicitante de cálculo (Equação 3.8.1.31) são obtidos pelas expressões:

$$f_{c90d} = 0,25 * f_{cd} * \alpha_n \quad (3.8.1.30)$$

$$\sigma_{c90d} = \frac{\text{Reação de apoio}}{b * h} \quad (3.8.1.31)$$

Sendo $\alpha_n = 1$, por a carga ser distribuída em toda a extensão da viga, temos:

$$f_{c90d} = 0,25 * 1,332 * 1 = 0,333 \text{ KN/cm}^2$$

$$\sigma_{c90d} = \frac{4,53}{6 * 12} = 0,063 \text{ KN/cm}^2$$

Logo verificamos que a condição é atendida.

Para verificar a condição de tensões cisalhantes, utilizamos as equações (3.8.1.27) e (3.8.1.28):

$$\tau_d = \frac{3 Vd}{2 * b * h} = \frac{3 * 2,87}{2 * 6 * 12} = 0,060 \text{ KN/cm}^2$$

Sendo a resistência cisalhante de dimensionamento 0,129 KN/cm², expressa na Tabela 09. Verificamos que a condição foi atendida.

Para verificarmos se há necessidade de contenção lateral na viga, utilizaremos as equações (3.8.1.29):

$$L_1 \leq \frac{E_{cef} * b}{\beta_M * f_{cd}} = \frac{7982,4 * 0,06}{8,8 * 13,32} = 4,086 \text{ m}$$

Sendo L1 maior que comprimento da viga, dispensa-se a verificação em relação à instabilidade lateral. Desse modo, a seção de 6,0 cm x12,00 cm atende as condições de segurança.

5.3.2 Análises dos montantes

Como especificado anteriormente, foram utilizados três tipos de montantes, os montantes simples, duplos e triplos. Os montantes duplos foram posicionados na abertura de portas e janelas, os montantes triplos foram utilizados para encontro de paredes e os simples para compor os painéis de parede.

Logo iremos considerar para análise dos resultados do *software* os montantes que ficam no banheiro, visto que esses são responsáveis por transmitir esforços maior, devidos às condições de carregamento. A Tabela 17 apresenta esforço atuante no montante retirado do *Robot*.

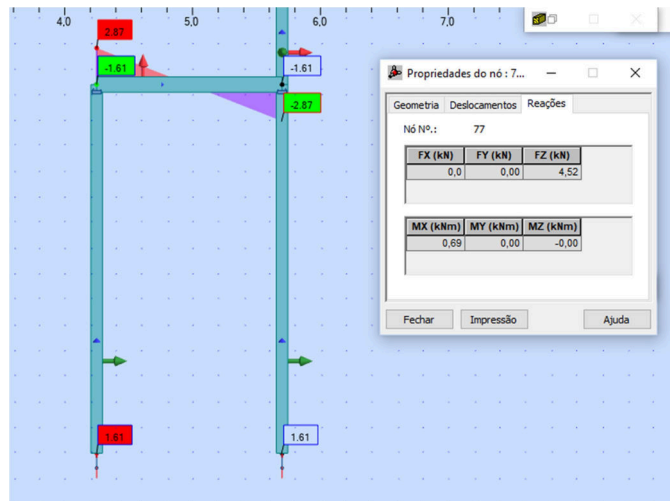
Tabela 17 - Esforço atuante no montante

Seção	Esforço devido reação de apoio da viga
6 cm x 12 cm	4,52 KN

Fonte: Autor (2022).

A Figura 61 apresenta as propriedades atuantes no nó 77, a qual é possível ver o valor da força atuante no montante.

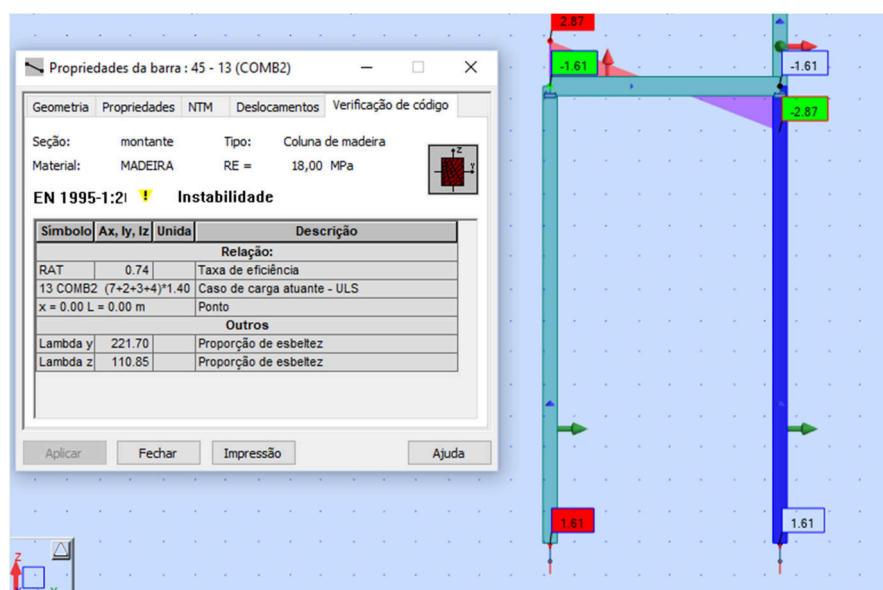
Figura 61 - Propriedades do nó 77.



Fonte: Autor (2022).

De acordo com os resultados fornecidos pelo *Robot*®, a seção do montante apresenta instabilidade. Na Figura 62 é possível verificar a informação de instabilidade. Logo, posteriormente foram analisados os cálculos realizados pelo programa.

Figura 62 - Propriedades da barra montante 45



Fonte: Autor (2022).

Inicialmente foi verificada a estabilidade do elemento seguindo as recomendações da NBR 7190. Como os montantes são submetidos a esforços normais, foi verificado a essas solicitações.

Primeiramente foi determinado o índice de esbeltez do montante, utilizando a equação (3.8.1.15):

$$\lambda = \frac{L_0}{i_{min}}$$

Sendo L_0 o comprimento do montante, que é de 2,80 m e i_{min} o raio de giração, o qual foi determinado em relação ao eixo x e y da seção, utilizando os dados da Tabela 11.

$$\lambda_x = \frac{280}{\sqrt{ix/A}} = \frac{280}{\sqrt{273,37/40,5}} = 107,69$$

$$\lambda_y = \frac{280}{\sqrt{iy/A}} = \frac{280}{\sqrt{68,34/40,5}} = 215,38$$

Logo o elemento é classificado como esbelto, sendo necessário dimensionamento a flexo-compressão.

Inicialmente foi determinada a carga crítica (Equação 3.8.1.23) e as excentricidades acidentais .

$$F_E = \frac{\pi^2 E_{c0ef} I}{L_0^2}$$

$$E_{c0,ef} = k_{mod} \cdot E_{c0,m}$$

$$F_{Ey} = \frac{\pi^2 798,24 \cdot 68,34}{280^2} = 6,86 \text{ KN}$$

$$F_{Ex} = \frac{\pi^2 798,24 \cdot 273,37}{280^2} = 27,44 \text{ KN}$$

Para determinar a excentricidade acidental utilizamos a Equação (3.8.1.22):

$$e_a = L/300$$

$$e_a = 280/300 = 0,93 \text{ cm}$$

A Tabela 18 apresenta os resultados do dimensionamento para peças solicitadas a esforço normal, seguindo o exposto das Equações (3.8.1.15) a (3.8.1.26).

Tabela 18 - Verificação dos montantes.

Mdx	Mdy	Σnd	σMdx	σMdy
5,03 KNcm	12,32 KNcm	1,1 Mpa	0,8 MPa	4,06 MPa

Fonte: Autor (2022).

As verificações foram feitas utilizando as equações (3.8.1.13) e (3.8.1.14):

$$\left(\frac{\sigma_{Ncd}}{f_{cd}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Mxd}}{f_{cd}} + K_M * \frac{\sigma_{Myd}}{f_{cd}} \leq 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{Ncd}}{f_{cd}}\right)^2 + K_M * \frac{\sigma_{Mxd}}{f_{cd}} + \frac{\sigma_{Myd}}{f_{cd}} \leq 1$$

$$\left(\frac{1,10}{13,32}\right)^2 + \frac{0,80}{13,32} + 0,5 * \frac{4,06}{13,32} \approx 0,219 \leq 1$$

$$\left(\frac{1,10}{13,32}\right)^2 + 0,5 * \frac{0,80}{13,32} + \frac{4,06}{13,32} \approx 0,342 \leq 1$$

$$\left(\frac{1,10}{19,32}\right)^2 + \frac{0,80}{19,32} + 0,5 * \frac{4,06}{19,32} \approx 0,15 \leq 1$$

$$\left(\frac{1,10}{19,32}\right)^2 + 0,5 * \frac{0,8}{19,32} + \frac{4,06}{19,32} \approx 0,234 \leq 1$$

Para verificar a estabilidade do montante quanto a flambagem global, foi utilizada a Equação (3.8.1.17):

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{cd}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{cd}} \leq 1$$

$$\frac{1,1}{13,32} + \frac{0,8}{13,32} \approx 0,14 \leq 1$$

$$\frac{1,1}{13,32} + \frac{4,06}{13,32} \approx 0,39 \leq 1$$

Logo é possível observar que os montantes passaram na verificação de acordo com a NBR 7190. No entanto, este apresenta um comprimento de

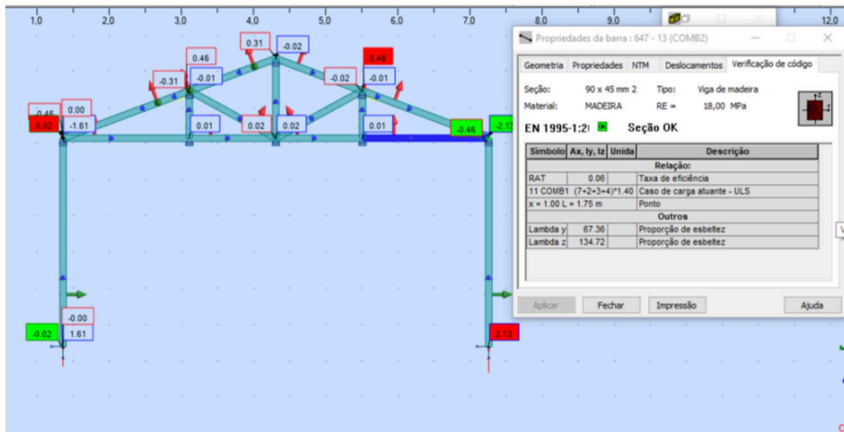
flambagem maior do que recomendado pela norma. Podendo ser por essa razão a informação de instabilidade notificada no *Robot®*.

Portanto, recomenda-se diminuir o comprimento de flambagem do elemento e/ou aumentar a área da seção. O comprimento de flambagem pode ser reduzido inserindo elemento de ligação entre dois montantes.

5.3.3 Tesouras

Analisando a estrutura das tesouras (Figura 63) foi observado que os elementos foram aprovados de acordo com as solicitações de carregamento.

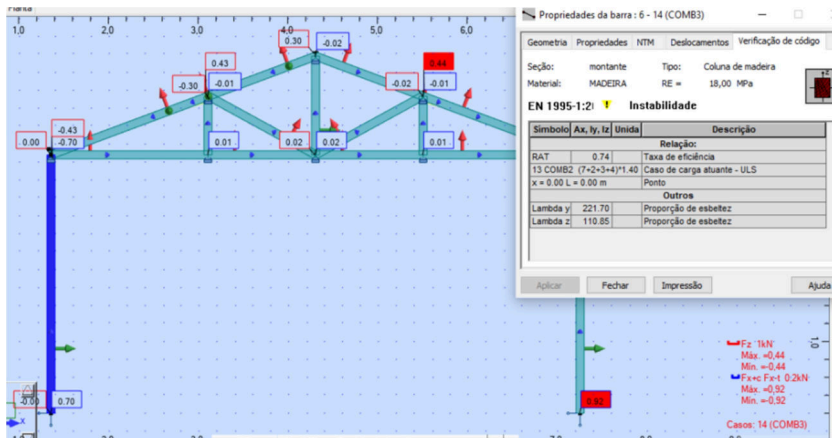
Figura 63 - Tesoura para cobertura.



Fonte: Autor (2022).

No entanto, nos montantes em que as tesouras foram apoiadas, foi apresentado instabilidade do elemento (Figura 64). Sendo, nesse caso recomendado aumentar a área da seção e reduzir o comprimento de flambagem do elemento.

Figura 64 - Instabilidade montante de apoio da tesoura.



Fonte: Autor (2022).

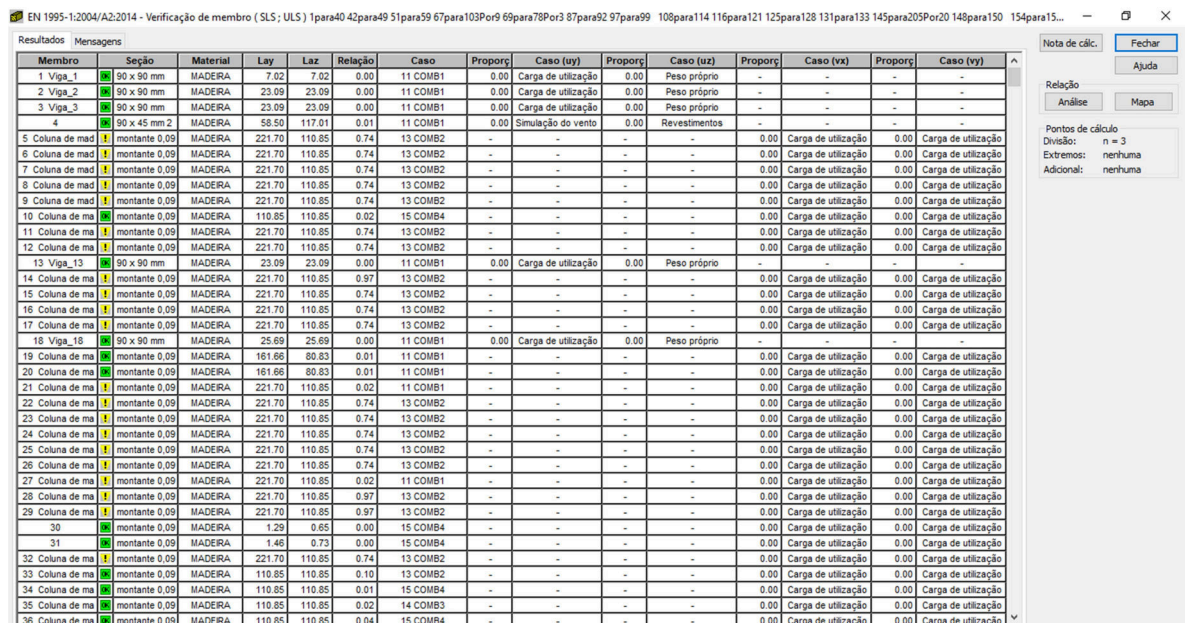
5.4 Gerar lista de elementos e método de cálculo.

A lista de elementos estruturais no *Robot®* pode ser gerada pela criação de grupos ou seleção de elementos estruturais. Além disso, é possível definir e alterar parâmetros de cálculo, como por exemplo, índice de esbeltez máximo.

Na lista de membros de projeto é exibido se as peças foram aprovadas no dimensionamento, com indicação também dos que apresentam instabilidade e ou não passaram nas verificações, assim como combinação de maior esforço considerada no dimensionamento e detalhes de cálculo.

A Figura 65 apresenta a lista de membros da estrutura.

Figura 65 - Lista de membros estruturais



The screenshot displays the 'Results' window of the Robot Structural Analysis software. The main area contains a table with columns for 'Membro', 'Seção', 'Material', 'Lay', 'Laz', 'Relação', 'Caso', 'Proporç', 'Caso (uy)', 'Proporç', 'Caso (uz)', 'Proporç', 'Caso (vx)', 'Proporç', and 'Caso (vy)'. The table lists 36 members, including beams (Viga_1, Viga_2, Viga_3, Viga_13, Viga_18, Viga_30, Viga_31) and columns (Coluna de mad, Coluna de ma). Each row provides specific data for these members, such as dimensions, material (MADERA), and various calculation results. On the right side of the window, there is a 'Nota de calc.' panel with buttons for 'Fechar', 'Ajuda', 'Relação', 'Análise', and 'Mapa'. Below these buttons, it shows 'Pontos de cálculo' (n = 3), 'Divisão' (n = 3), 'Extremos' (nenhuma), and 'Adicional' (nenhuma).

Membro	Seção	Material	Lay	Laz	Relação	Caso	Proporç	Caso (uy)	Proporç	Caso (uz)	Proporç	Caso (vx)	Proporç	Caso (vy)
1 Viga_1	90 x 90 mm	MADERA	7.02	7.02	0.00	11 COMB1	0.00	Carga de utilização	0.00	Peso próprio	-	-	-	-
2 Viga_2	90 x 90 mm	MADERA	23.09	23.09	0.00	11 COMB1	0.00	Carga de utilização	0.00	Peso próprio	-	-	-	-
3 Viga_3	90 x 90 mm	MADERA	23.09	23.09	0.00	11 COMB1	0.00	Carga de utilização	0.00	Peso próprio	-	-	-	-
4	90 x 45 mm 2	MADERA	58.50	117.01	0.01	11 COMB1	0.00	Simulação do vento	0.00	Revestimentos	-	-	-	-
5 Coluna de mad	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.74	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
6 Coluna de mad	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.74	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
7 Coluna de mad	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.74	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
8 Coluna de mad	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.74	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
9 Coluna de mad	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.74	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
10 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	110.85	110.85	0.02	15 COMB4	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
11 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.74	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
12 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.74	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
13 Viga_13	90 x 90 mm	MADERA	23.09	23.09	0.00	11 COMB1	0.00	Carga de utilização	0.00	Peso próprio	-	-	-	-
14 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.97	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
15 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.74	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
16 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.74	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
17 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.74	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
18 Viga_18	90 x 90 mm	MADERA	25.69	25.69	0.00	11 COMB1	0.00	Carga de utilização	0.00	Peso próprio	-	-	-	-
19 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	161.66	80.83	0.01	11 COMB1	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
20 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	161.66	80.83	0.01	11 COMB1	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
21 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.02	11 COMB1	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
22 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.74	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
23 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.74	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
24 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.74	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
25 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.74	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
26 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.74	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
27 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.02	11 COMB1	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
28 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.97	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
29 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.97	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
30	montante 0.09	MADERA	1.29	0.65	0.00	15 COMB4	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
31	montante 0.09	MADERA	1.46	0.73	0.00	15 COMB4	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
32 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	221.70	110.85	0.74	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
33 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	110.85	110.85	0.10	13 COMB2	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
34 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	110.85	110.85	0.01	15 COMB4	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
35 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	110.85	110.85	0.02	14 COMB3	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização
36 Coluna de ma	montante 0.09	MADERA	110.85	110.85	0.04	15 COMB4	-	-	-	-	0.00	Carga de utilização	0.00	Carga de utilização

Fonte: Autor (2022).

A Figura 66 apresenta a memória de cálculo realizada pelo *software*. No qual é possível verificar as relações matemáticas consideradas para o dimensionamento do elemento estrutural.

Figura 66 - Resultado de cálculo do montante 14.

RESULTADOS - Código - EN 1995-1:2004/A2:2014

Barra: 14 Coluna de madeira_14
Ponto/coordenada: 1 / x = 0.00 L = 0.00 m
Caso de carga: 13 COMB2 (7+2+3+4)*1.40+12*1.20+5*0.50+6*0.20

Instabilidade

montante 0,09x0,045

Resultados simplificados Deslocamentos Resultados detalhados

TENSÕES DE CÁLCULO
 $\sigma_{c,0,d} = 2.13/40.50 = 0.52 \text{ MPa}$
 $\tau_{y,d} = 1.5^*0.00/40.50 = -0.00 \text{ MPa}$
 $\tau_{z,d} = 1.5^*0.00/40.50 = -0.00 \text{ MPa}$

TENSÕES TOLERÁVEIS
 $f_{c,0,d} = 20.49 \text{ MPa}$
 $f_{v,d} = 3.55 \text{ MPa}$

FATORES E PARÂMETROS ADICIONAIS
 $k_h = 1.27$ $k_{mod} = 0.60$ $K_{sys} = 1.00$ $k_{cr} = 0.67$

FLAMBAGEM LATERAL

FLAMBAGEM Y
 $L_Y = 2.88 \text{ m}$ $\lambda_{rel,Y} = 6.07$
 $L_{FY} = 2.88 \text{ m}$ $k_y = 19.50$
 $\lambda_{Y} = 221.70$ $k_{cy} = 0.03$

FLAMBAGEM Z
 $L_Z = 2.88 \text{ m}$ $\lambda_{rel,Z} = 3.04$
 $L_{FZ} = 2.88 \text{ m}$ $k_z = 5.38$
 $\lambda_{Z} = 110.85$ $k_{cz} = 0.10$

RESULTADOS
 $\sigma_{c,0,d}/f_{c,0,d} = 0.52/20.49 = 0.03 < 1.00$ (6.23-4)
 $\sigma_{c,0,d}/(k_{cy}f_{c,0,d}) = 0.52/(0.03^*20.49) = 0.97 < 1.00$ (6.23-4)
 $(\tau_{y,d}/k_{cr})/f_{v,d} = (0.00/0.67)/3.55 = 0.00 < 1.00$ $(\tau_{z,d}/k_{cz})/f_{v,d} = (0.00/0.67)/3.55 = 0.00 < 1.00$ (6.13)

Fonte: Autor (2022).

Na Figura 67, os resultados de cálculo são apresentados de forma mais detalhada. No qual informa valor, unidade e descrição de cada símbolo, o que ajuda na análise da estrutura.

Figura 67 - Resultado detalhado do montante 14.

RESULTADOS - Código - EN 1995-1:2004/A2:2014

Barra: 14 Coluna de madeira_14
Ponto/coordenada: 1 / x = 0.00 L = 0.00 m
Caso de carga: 13 COMB2 (7+2+3+4)*1.40+12*1.20+5*0.50+6*0.20

Instabilidade

montante 0,09x0,045

Resultados simplificados Deslocamentos Resultados detalhados

Símbolo	Valor	Unidade	Descrição do símbolo	Seção
Propriedades da seção transversal: montante 0,09x0,045				
Ax	40.50	cm ²	Área da seção transversal	
Ay	27.00	cm ²	Área de cisalhamento - eixo Y	
Az	27.00	cm ²	Área de cisalhamento - eixo Z	
Ix	187.6	cm ⁴	Constante de torção	
Iy	68.34	cm ⁴	Momento de inércia da seção em torno do eixo Y	
Iz	273.38	cm ⁴	Momento de inércia da seção em torno do eixo Z	
Wy	30.38	cm ³	Módulo elástico de seção em torno do eixo Y	
Wz	60.75	cm ³	Módulo plástico de seção elástico em torno do eixo Z	
ht	4.5	cm	Altura da seção transversal	
bf	9.0	cm	Largura da seção transversal	
tf	2.2	cm	Espessura da mesa	
tw	2.2	cm	Espessura da alma	
ry	1.3	cm	Raio de rotação - eixo Y	
rz	2.6	cm	Raio de rotação - eixo Z	
Material:				
Nome			MADERA	
gM	1.30		Coeficiente de segurança do material	[2.4.1]
f _{m,0,k}	53.14	MPa	Resistência da flexão	[EN 338]
f _{t,0,k}	82.80	MPa	Resistência da tensão	[EN 338]
f _{c,0,k}	44.40	MPa	Resistência da compressão	[EN 338]

Fonte: Autor (2022).

Portanto, é possível observar que o programa fornece resultados satisfatórios dos elementos. Apesar do programa não possuir a norma brasileira na base de dimensionamento, os resultados da análise da estrutura se apresentam coerentes e bem detalhados, o que facilita na análise do sistema e manuseio do programa.

A tecnologia BIM está cada vez mais presente na construção civil. Foi possível notar na integração entre os softwares que não houve perda de dados, os elementos projetados foram fielmente enviados de acordo com as características e propriedades empregadas. Sendo necessários, apenas, pequenos ajustes para adaptação do projeto. Além disso, ressalta a importância do *Revit®* na elaboração de perspectiva tridimensional, possibilitando melhor visualização dos elementos do projeto, garantindo melhor apresentação do projeto como um todo.

No entanto, como relatado por Pizza, I (2017), percebeu-se que na elaboração da estrutura no *Revit®* o modelo analítico possui modo automático, que inicialmente não reconhece algumas concepções de projeto, gerando inconsistência. Os elementos quando apoiados sobre outro, no modelo analítico a estrutura é apresentada como se estivesse flutuando. Logo, a elaboração de projetos com muitos elementos estruturais deve ser realizada com cuidados, analisando a concepção estrutural do modelo analítico para não haver divergente entre informações.

6- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a concepção estrutural e método construtivo do sistema *Wood Frame* para casa padrão popular, utilizando a integração entre *softwares Revit*® e *Robot*, para modelagem e análise da estrutura, respectivamente. Diante dos resultados obtidos, conclui-se que a adoção da tecnologia BIM contribui significativamente para o processo de elaboração e qualidade de projetos. Por meio dos *softwares* foi possível obter bons resultados representativos e de dimensionamento. O sistema *Wood Frame*, apesar de já ser bem desenvolvido fora do Brasil, no país ainda é pouco aceito. Logo, conclui-se que a discussão desse sistema levanta questionamentos quanto a sua utilização.

Logo, como para a elaboração deste trabalho não foram consideradas estruturas de contraventamento, sugere-se para elaboração de trabalhos futuros a análise do emprego das chapas de OSB no contraventamento da estrutura. Ainda, sugere-se a elaboração de modelo para análise dos tipos de conexões a serem empregadas no elemento.

Para os objetivos específicos proposto neste trabalho, tem-se:

- A madeira apresentou ótimas propriedades mecânicas, podendo ser empregada com segurança como elemento estrutural, trazendo benefícios significativos para o setor da construção civil;
- Na elaboração do modelo estrutural no *Revit*® foram percebidas algumas inconsistências no modelo analítico. Como a modelagem se trata da criação de diversos elementos, a modelagem deve ser feita com cuidado, a fim de se evitar erros na interação dos membros. Apesar do *software Revit*® apresentar inconsistências na elaboração do modelo analítico, o mesmo possui diversas ferramentas capazes de aperfeiçoar os processos de elaboração de projetos, melhorando a interação de informações entre sistemas e apresentando ótima representação tridimensional da estrutura;
- No link de integração entre os *softwares Revit*® e *Robot*® notou-se que no intercâmbio dos dados entre os dois programas não houve perda de informações. A interação é rápida e de fácil operação, transmitindo resultados precisos e atualizados. As propriedades dos elementos definidas no *Revit*® foram fielmente transferidas ao *Robot*®;

- Quanto à análise estrutural no *Robot*®, notou-se que o programa apresenta resultados detalhados dos métodos de cálculo do dimensionamento. Sendo todos os elementos aprovados na análise do sistema, apresentando somente instabilidade em alguns elementos. No entanto, *Robot*®, por não possuir a norma brasileira na sua base de cálculo, se faz necessário à verificação dos elementos fora do programa com base nas normativas brasileiras.

REFERÊNCIAS

ALLEN, E.; THALLON, R. *Fundamentals of Residential Construction*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.

ALMEIDA, F. A. L. A madeira como material estrutural – projeto da estrutura da cobertura de um edifício. *Disertação de mestrado*. Universidade do Porto, 2012.

ARAUJO, V. A. *et al.* Classification of wooden housing building systems. **BioResources**, v. 11, n. 3, p. 7889-7901, 2016.

ALVARENGA, Bruno; CARVALHO, Maria Júlia. **Capacitação: Introdução ao Revit**. 2020. 30 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande - Furg., Rio Grande, 2020. Disponível em: https://petcivil.furg.br/images/PDF/Capacit_2020/Apostila_Revit.pdf. Acesso em: 25 maio 2022.

ALMEIDA, J. P. B.; COUTO, N. G.; AQUINO, V. B. de M.; WOLENSKI, A. R. V.; PEIXOTO, R. G.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Relações entre propriedades de rigidez para distintas solicitações mecânicas visando projetos de estruturas de madeira. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 25-35, abr./jun. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: Abnt, 1980.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **WFCM 2015**: Wood Frame Construction Manual for One- and Two-family Dwellings. 2015 ed. Leesburg: Ansi, 2015. 324 p. Disponível em: https://files4.1.revize.com/wakullacountyfl/departments/building_department1/docs/AWC-WFCM2015-ViewOnly-1510.pdf. Acesso em: 10 mar. 2022.

BURROWS, J. Canadian Wood-Frame House Construction. 3ed. Toronto: Canada Mortgage and Housing Corporation, 2014. 351p. ISBN 0-660-19535-6.

CRUZ,D.V., Casas de Madeira: Um estudo de caso Brasil e EUA. 2006.132p. Tese (Mestrado – e Mestre em Ciências em Arquitetura, área de concentração em Racionalização do Projeto e da Produção) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

COINASKI, M. S.; SIQUEIRA, V. A. Wood Frame: um estudo de atendimento às normas e à cultura habitacional brasileira.2016.72p. Monografia (Engenharia Civil).Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco, 2016.

DRYPLAN ENGENHARIA.: Fundação radier para casas térreas e sobrados. 2016. Disponível em:< <http://www.dryplan.com.br/blog/ler/pID/24/fundacao-radier-para-casas-terreas-e-sobrados.php> >. Acesso em:10 de fevereiro de 2022.

DUARTE, Débora Sofia Silva. Projeto de Estruturas de um Hotel no Porto. 2019. 239 f. Tese (Mestrado) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2019.

ESPÍNDOLA, L. R. O wood frame na produção de habitação social no Brasil. 2017. 331p. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

FREITAS, Isabela Mauricio. **OS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL NO MUNICÍPIO DE ARARAQUARA/SP**. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente, Centro Universitário de Araraquara - Uniara, Araraquara, 2009.

IPT (São Paulo). Instituto de Pesquisa Tecnológica. **Madeira na construção:** pesquisadora do ipt discute cenário mundial do uso da madeira em edificações. brasil ainda dá primeiros passos.. Pesquisadora do IPT discute cenário mundial do uso da madeira em edificações. Brasil ainda dá primeiros passos.. 2019. Disponível em: https://www.ipt.br/centros_tecnologicos/CT-FLORESTA/noticias/1568-madeira_na_construcao.htm. Acesso em: 10 jan. 2022.

Kuklík, P. (2008a). History of timber structures. In Handbook 1 – Timber structures, 1-14, Leonardo Da Vinci Pilot Projects, Praga (República Checa).

LIMA, E.C. **Radiers**. Equipe de obra. Ed. 42. Novembro de 2011. São Paulo: Pini. Disponível em: < <http://equipededeobra17.pini.com.br/construcao-reforma/42/fundacoes-radiers-241672-1.aspx>> Acesso em: 15 de janeiro de 2022.

LIMA, Cladia Campos Netto Alves de. **Autodesk Revit Architecture 2015: Conceitos e aplicações**. São Paulo: Erica Ltda, 2014. 432 p. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/341306/mod_resource/content/1/REVIT.pdf. Acesso em: 25 maio 2022.

LP BRASIL. **Catálogo técnico placas estruturas para construção CES**. 2012. Disponível em: < <https://www.lpbrasil.com.br/produtos/lp-osb-home-plus/#> > Acesso em 21 de abril de 2021.

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

PIZA, Isabella Faria. Roteiro de modelagem estrutural utilizando a tecnologia Bim, desde a modelagem no Revit até a Análise Estrutural no Robot. 2017. 84 f. Monografia (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campo Mourão, 2017.

PINTO, T. P. Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil: a experiência do SINDUSCON-SP. São Paulo, 2005. 48p.

RIBEIRO, S.; BATTISTELLE, R.A.G.; TENÓRIO, J.A.S. 2008. Inventário dos Resíduos da Construção Civil na Região Metropolitana de São Paulo. In: VI Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental - ABES-RS e PUCRS/FENG (SIQA), Porto Alegre, 2008. Anais... Porto Alegre, 2008, 7 p.

ROTH, C. das G., & Garcias, C. M. (2009). Construção Civil e a Degradação Ambiental. *Desenvolvimento Em Questão*, 7(13), 111–128.

SISTEMA NACIONAL DE AVALIAÇÕES TÉCNICAS. **Nº 005**: Sistemas construtivos estruturados em peças leves de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas (Sistemas leves tipo “Light Wood Framing”). Brasília: Diretriz Sinat, 2017. 73 p. Disponível em: https://www.tecverde.com.br/wp-content/uploads/2016/07/Sinat-005-Wood-Frame_Revis%C3%A3o-2.pdf. Acesso em: 15 mar. 2022.

SANTA CLARA EUCALIPTO TRATADO. **Eucalipto tratado: imunização da madeira em autoclave**. 2016. Disponível em: < <http://www.santaclaramadeiras.com.br/eucalipto-tratado-imunizacao-da-madeira-em-autoclave/> > Acesso em: 21 de abril de 2021

SACCO, M. F.; STAMATO, G. C. Light wood frame - construções com estrutura leve de madeira. *Revista TÉCNICA: Como construir*, 2010.

TECVERDE. **Estanqueidade da Água e Resistência a Umidade**. .: ., 2020. 12 slides, color. Disponível em: https://www.tecverde.com.br/wp-content/uploads/2020/09/Ebook-normas-tecnicas_Resistencia-%C3%A0-umidade.pdf. Acesso em: 29 jan. 2022.

TECVERDE. Panorama do sistema construtivo Tecverde. Curitiba: Tecverde Construções eficientes. 2016a.

TECVERDE ENGENHARIA LTDA. Como projetar em wood frame: Principais características do sistema construtivo wood frame e diretrizes para desenvolvimento de projetos arquitetônicos. São Francisco – Curitiba, s/d. Site: <http://pt.scribd.com/doc/71851250/6491-Diretrizes-Para-Projetar-Em-WoodFrame-Tecverde>.

TORQUATO, Mario Leonardo. **Estudo comparativo quanto a preceitos da sustentabilidade entre o método tradicional de produção e o sistema Light**

Wood Framing para a construção de biblioteca cidadã. 2010. 82 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Construção de Obras Públicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

USP. **Construção em madeira:** sistema plataforma. Sistema Plataforma. 2020. Disponível em: <http://www.usp.br/nutau/madeira/paginas/introducao/introducao.htm>. Acesso em: 25 jan. 2022

ZENID, Geraldo José. **MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL.** 2015. 8 f. Tese (Doutorado) - Curso de Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. , São Paulo, 2015.

ANEXO A – MODELO 3D.



