

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

LEONARDO SABAT

**ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE UMA EDIFICAÇÃO
RESIDENCIAL EM WOOD FRAME**

**CAXIAS DO SUL
2020**

LEONARDO SABAT

**ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE UMA EDIFICAÇÃO
RESIDENCIAL EM WOOD FRAME**

Trabalho acadêmico desenvolvido como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II.

Orientador: Prof. Me. Gustavo Ribeiro da Silva

CAXIAS DO SUL

2020

RESUMO

Atualmente, o Brasil possui como principais métodos construtivos alvenaria estrutural e concreto armado, dos quais a tecnologia e evolução na execução avançaram muito pouco nos últimos anos: os índices de desperdício e atrasos de obra ainda são muito altos. Para mudar esse cenário requer investimento em tecnologia e abertura de mercado para a utilização de outros métodos mais eficientes, como o *light wood frame*. Em um país onde a área de reflorestamento é crescente, como o Brasil, a probabilidade de sucesso na implementação desse sistema é muito grande. Além da abundância do principal material necessário nesse método construtivo, há grande oferta de mão de obra disponível, porém não especializada. Algumas das grandes dificuldades da aplicação do sistema *light wood frame* no Brasil são a falta de conhecimento do assunto, material técnico e normatizações técnicas, o que acaba gerando desconhecimento do método construtivo. Tendo isso em vista, o objetivo do presente trabalho é pré-dimensionar uma estrutura residencial em *wood frame* baseando-se na norma americana (*Wood Frame Construction Manual*) e verificar os esforços com as prescrições da norma brasileira de Projetos de Estruturas de Madeira, a NBR 7190:1997. Após modelar a estrutura no software SCIA Engineer, onde foram obtidos os valores das tensões exercidas em cada elemento da estrutura, foi possível verificar se cada um deles suporta as cargas exercidas nas conformidades da Norma Brasileira. Levando em conta que este trabalho tem como limitação os esforços horizontais contraventamento, conclui-se que é possível fazer o dimensionamento de uma estrutura segura em *wood frame* utilizando a norma americana em seu pré dimensionamento e aplicando parâmetros de ações e material da Norma Brasileira. Todos os elementos, como pilares e vigas secundárias apresentam dimensionamento de acordo com o exigido na NBR 7190:1997, porém, deve-se dar uma atenção especial para vigas que suportam vãos maiores, pois estas podem ser sub dimensionadas dependendo do comprimento do vão livre e da carga exercida sobre elas.

Palavras-chave: wood frame, construção em madeira.

ABSTRACT

Nowadays, the main Brazilian construction methods are blocks and concrete, which technology and evolution have not advanced much in the last years: the wastefulness and delay rates on most of the constructions are too high. Changing this scenario requires investment in technology and market opening to methods that are more efficient take place, like light wood framing. In a country where the reforestation rates are increasing, like Brazil, the chances of success on the implementation of this system are very high. Besides the abundance of the main raw material needed to this constructive method, there is plenty of labor force available, but not well trained for it. Some of the biggest issues on the implementation of the light wood frame system in Brazil are the lack of acknowledgement about, technical information and standardization, what makes the light wood frame less popular. Having this in sight, the main objective of this work is to precise a domestic structure using the American norm "Wood Frame Construction Manual" and also to verify the main strains with the Brazilian norm for timber designed constructions, the NBR 7190:1997. Thereupon modelling the structure at SCIA Engineer software, where tension values were obtained for each structural element, it was possible to verify if each one of those elements were able to support the loads performed on it, in accordance to the Brazilian regulation. Considering the fact this work has as a limitation the inclusion of shear forces, it is concluded that it is possible to pre design a safe wood frame structure with the American normalization and using the Brazilian normalization of loads and materials. All structural elements, like pillars and joists, are correctly designed according to the Brazilian normalization for timber structures, although, beams with larger spans can be undersized, depending on the length of the span and the loads acting on the element.

Key-words: wood frame, timber construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de estrutura no sistema <i>baloon frame</i>	9
Figura 2: Exemplo de estrutura no sistema <i>platform frame</i>	10
Figura 3: Tipos de fundação utilizados no sistema wood frame.	11
Figura 4: Componentes da parede externa.	12
Figura 5: Modelos de telhado.	13
Figura 6: Chapa OSB.....	15
Figura 7: Exemplo de bloqueamento nas vigas.	18
Figura 8: Pressão exercida na cobertura da garagem (kN/m ²).	28
Figura 9: Pressão exercida na cobertura da residência (kN/m ²).	28
Figura 10: Exemplo de tabela utilizada para escolha de parâmetros de vigas secundárias.	29
Figura 11: Estrutura do pavimento térreo.	30
Figura 12: Vigas de reforço no vão da escada.	31
Figura 13: Viga com medida especial.	32
Figura 14: Estrutura das paredes.	33
Figura 15: Reforço em vãos de aberturas.....	34
Figura 16: Viga com medida especial no vão de entrada da garagem.	35
Figura 17: Estrutura do telhado.	36
Figura 18: Solicitação do pilar principal.	37
Figura 19: Solicitação do pilar secundário.	38
Figura 20: Momento fletor – viga vão da janela.	40
Figura 21: Momento fletor - viga 20x30 cm.....	41
Figura 22: Deformada da estrutura.	45
Figura 23: Deformada da estrutura do telhado	45
Figura 24: Deformada da estrutura do pavimento térreo.	46
Figura 25: Flechas das vigas de seção especial da residência.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classes de carregamento.	20
Tabela 2: Classes de umidade.	21
Tabela 3: Cargas variáveis.	26
Tabela 4: Peso dos componentes construtivos.	27
Tabela 5: Tensões atuantes e resistência da viga principal.....	39
Tabela 6: Tensões atuantes e resistência da viga principal redimensionada.	39
Tabela 7: Tensões atuantes e resistência da viga secundária..	39
Tabela 8: Tensões atuantes e resistência da viga do vão de janelas.	40
Tabela 9: Tensões atuantes e resistência da viga especial 20x30 cm.	41
Tabela 10: Tensões atuantes e resistência da viga especial redimensionada.	42
Tabela 11: Tensões atuantes e resistência da cumeeira.....	42
Tabela 12: Tensões atuantes e resistência da linha.	43
Tabela 13: Tensões atuantes e resistência da empena.....	43
Tabela 14: Tensões atuantes e resistência da viga de reforço do vão da escada.	43
Tabela 15: Verificação de segurança de estados limites dos elementos horizontais.	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
1.1	objetivo geral	6
1.2	objetivos específicos	6
1.3	LIMITAÇÕES	7
1.4	QUESTÃO DE PESQUISA	7
1.5	hipótese	7
2	SISTEMA ESTRUTURAL LIGHT WOOD FRAME	8
2.1	PROCESSO CONSTRUTIVO	8
2.2	VANTAGENS E DESVANTAGENS	13
2.3	MATERIAIS UTILIZADOS	14
3	NORMAS E MANUAIS DE VERIFICAÇÃO E DIMENSIONAMENTO	16
3.1	wood frame construction manual	17
3.1.1	Descrição sobre as disposições estruturais	17
3.2	NBR 7190:1997 – PROJETO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA	19
3.2.1	Resistência à tração	19
3.2.2	Resistência à compressão	21
3.2.3	Resistência à flexão	22
3.2.4	Resistência ao cisalhamento	23
3.2.5	Deformações limites	23
4	METODOLOGIA	24
5	ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO	26
5.1	parâmetros de dimensionamento	26
5.2	CONCEPÇÃO ESTRUTURAL	29
5.2.1	Pavimentos	30
5.2.2	Paredes	32
5.2.3	Telhado	35

5.3	RESULTADOS DE ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL.....	36
5.3.1	Elementos Verticais.....	37
5.3.2	Elementos horizontais.....	38
5.3.3	Elementos do telhado.....	42
5.3.4	Deformações limites da estrutura	43
6	CONCLUSÕES	47

1 INTRODUÇÃO

Em países desenvolvidos da América do Norte, Europa e Ásia, o sistema construtivo com maior escala de utilização é o *light wood frame* (LWF), cuja explicação para tamanha popularidade aceitação do sistema é o fato do preço da mão de obra nesses países: a escassa mão de obra acaba naturalmente se tornando mais cara, obrigando a otimizar sua utilização (MOLINA; CALIL, 2010). Por ser um sistema industrializado, possibilita maior controle de qualidade e redução da utilização de mão de obra, o que acaba revelando o motivo de ser o processo construtivo mais utilizado em países desenvolvidos (MOLINA; CALIL, 2010). Anderson (1975) afirma que construções em LWF podem ser construídas em qualquer local, além de serem econômicas e duradouras.

O sistema construtivo *wood frame* vive cenários distintos no Brasil e em países desenvolvidos da América do Norte e Europa. Segundo Thallon (2008), o LWF na América do Norte é um sistema cujo uso em grande escala de deu início há 150 anos, sendo hoje o sistema construtivo utilizado em mais de 90% das construções do continente. Já no Brasil, apesar dos avanços tecnológicos, o sistema mais utilizado é o de alvenaria de blocos, do qual a grande aplicabilidade se deve à pressuposição de grande durabilidade e questões culturais (NASCIMENTO, 2004). Segundo a Revista *Téchne* (*LIGHT wood frame...*, 2009), no sul do Brasil existem empresas, como a Tecverde, que utilizam o LWF como principal método construtivo para a realização de obras. Existem hoje no Brasil “mais de 50 profissionais, formadores de opinião, representantes de associações e empresas do setor madeireiro, construtivo, acadêmico, financeiro e tecnológico” unidos para desenvolver e expandir a implementação do sistema LWF no Brasil (MOLINA; CALIL, 2010).

Apesar da barreira cultural, o mercado brasileiro possui grande potencial de expansão por ser escasso de alternativas sustentáveis e por ter condições favoráveis, como grandes áreas de reflorestamento (MOLINA; CALIL, 2010). Outros obstáculos de significativa relevância que dificultam a aplicação do sistema no Brasil é a falta de normas regulamentadoras para reger e dar suporte a quem pretende utilizar o sistema LWF e “ausência de incentivos, leis e participação governamental” (LEITE; LAHR, 2015). Segundo o site da ABNT (2016), foi dado início à elaboração de uma Norma Regulamentadora Brasileira para estruturas em *wood frame* ainda em 2016, quando

foi instalada uma Comissão de Estudos. Até então, a única norma técnica brasileira da qual pode-se utilizar como apoio para projetos de construções em estruturas de madeira é a NBR 7190, elaborada em 1997, porém essa norma trata apenas de estruturas de madeira como “pontes, pontilhões, coberturas, pisos e cimbres” (ABNT NBR 7190, 2007). Conseqüentemente, o padrão construtivo abordado na norma ABNT NBR 7190 (2007) não tem relação com o sistema LWF utilizado mundialmente para a construção de edificações.

Por ser um sistema utilizado há muito tempo nos Estados Unidos, a facilidade de encontrar mão de obra especializada, ferramentas e matéria prima necessárias tornam-se fatores facilitadores para a popularização e execução de obras em LWF (NASCIMENTO, 2004). Thallon (2008) afirma que o LWF é um sistema largamente adotado nos Estados Unidos também devido à sua flexibilidade: praticamente qualquer design pode ser executado, independentemente de formatos ou estilos. Ademais, ele afirma que a construção é facilitada devido aos módulos pequenos; ferramental e mão de obra de fácil acesso; e disponibilidade de material. Além disso, existe uma norma regulamentadora disponível, uma espécie de manual para dimensionamento de estruturas em LWF, o *Wood Frame Construction Manual*, do *American Wood Council*, que será utilizado no presente trabalho para o pré-dimensionamento da estrutura. Nele são fornecidas recomendações e prescrições de projeto, informações gerais sobre cargas e resistências, além de outras soluções e recomendações para a construção de estruturas em LWF (WFCM, 2018).

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar e dimensionar uma edificação residencial em *wood frame*.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) pré-dimensionamento de elementos estruturais tendo como base a norma americana WFCM (*Wood Frame Construction Manual*);
- b) determinar as tensões solicitantes nos elementos da estrutura a partir de uma análise em elementos finitos;

- c) determinar as tensões resistentes de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997);
- d) comparar pré-dimensionamento com dimensionamento final da estrutura.

1.3 LIMITAÇÕES

As limitações deste trabalho são as seguintes:

- a) métodos e materiais de ligações e conexões dos elementos da estrutura não serão analisados;
- b) cargas sobre a estrutura derivadas de abalos sísmicos e ocorrência de neve não serão considerados;
- c) o contraventamento não será considerado para o dimensionamento deste projeto.

1.4 QUESTÃO DE PESQUISA

Existem limitações na utilização da norma ABNT NBR 7190 (1997) para dimensionamento de estruturas em *wood frame*?

1.5 HIPÓTESE

Existem limitações no dimensionamento devido falta de prescrições específicas para estruturas de *wood frame*.

2 SISTEMA ESTRUTURAL LIGHT WOOD FRAME

O *light wood frame* é um sistema de construção industrializado para a execução de edificações com até cinco pavimentos, “estruturado em perfis de madeira reflorestada tratada, formando painéis de pisos, paredes e telhado que são combinados e/ou revestidos com outros materiais”, com isolamentos térmico e acústico de alto desempenho e excelente resistência ao fogo (MOLINA; CALIL, 2010). Os módulos e painéis que compõem a estrutura em LWF são confeccionados em painéis de madeira, constituídos de perfis de madeira leve, e contraventamento feito com placas estruturais de OSB (LEITE; LAHR, 2015). Anderson (1975) afirma que as fundações que suportam a estrutura LWF podem ser confeccionados em concreto ou em blocos e existem diversos sistemas e métodos construtivos, os quais não entram no mérito deste trabalho.

Dentre as subestruturas que compõem uma estrutura em LWF, segundo ESPINDOLA (2010), podemos citar:

- a) cobertura;
- b) supraestrutura;
- c) paredes;
- d) piso;
- e) fundação.

2.1 PROCESSO CONSTRUTIVO

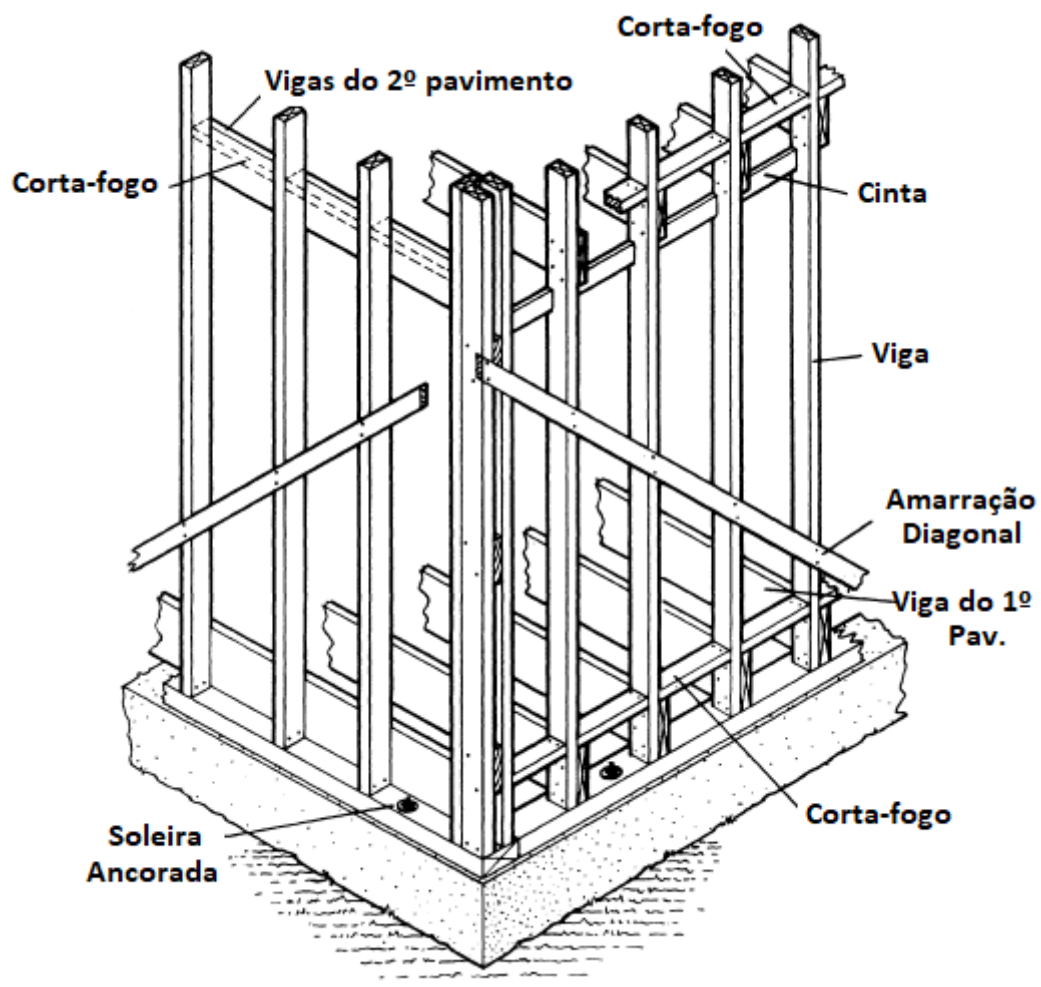
Anderson (1975) declara que há dois tipos de construções em light wood frame a serem utilizados após a fundação: sistema *Balloon Frame* (sistema balão) e *Platform Frame* (sistema plataforma).

No sistema balão, segundo Anderson (1975), os elementos verticais da estrutura são contínuos ao longo dos pavimentos, ou seja, da fundação ao teto (representado na Figura 1). Desenvolvida nos anos 1840, é um método construtivo um tanto arcaico e que caiu praticamente em desuso por requerer maior mão de obra, necessitar de peças de madeira muito compridas, ter menor eficiência de resistência ao fogo; atualmente foi substituída pelo sistema plataforma (THALLON, 2008). Anderson (1975) afirma que um dos usos do sistema balão se dá em residências de

dois pavimentos com revestimento em alvenaria: a continuidade da estrutura da fundação até o telhado em peças únicas previne rachaduras entre pavimentos. Ainda há outras situações em que o sistema *balloon frame* é útil e seu uso pode ser justificado (THALLON, 2008):

- a) Quando o comprimento das vigas é maior que a altura do teto a resistência da parede aumenta;
- b) para reduzir o efeito de encolhimento das fibras nas vigas, como ocorre em sistemas *platform frame*;
- c) em áreas de vento lateral muito forte, pois a resistência da parede é maior por ser contínua.

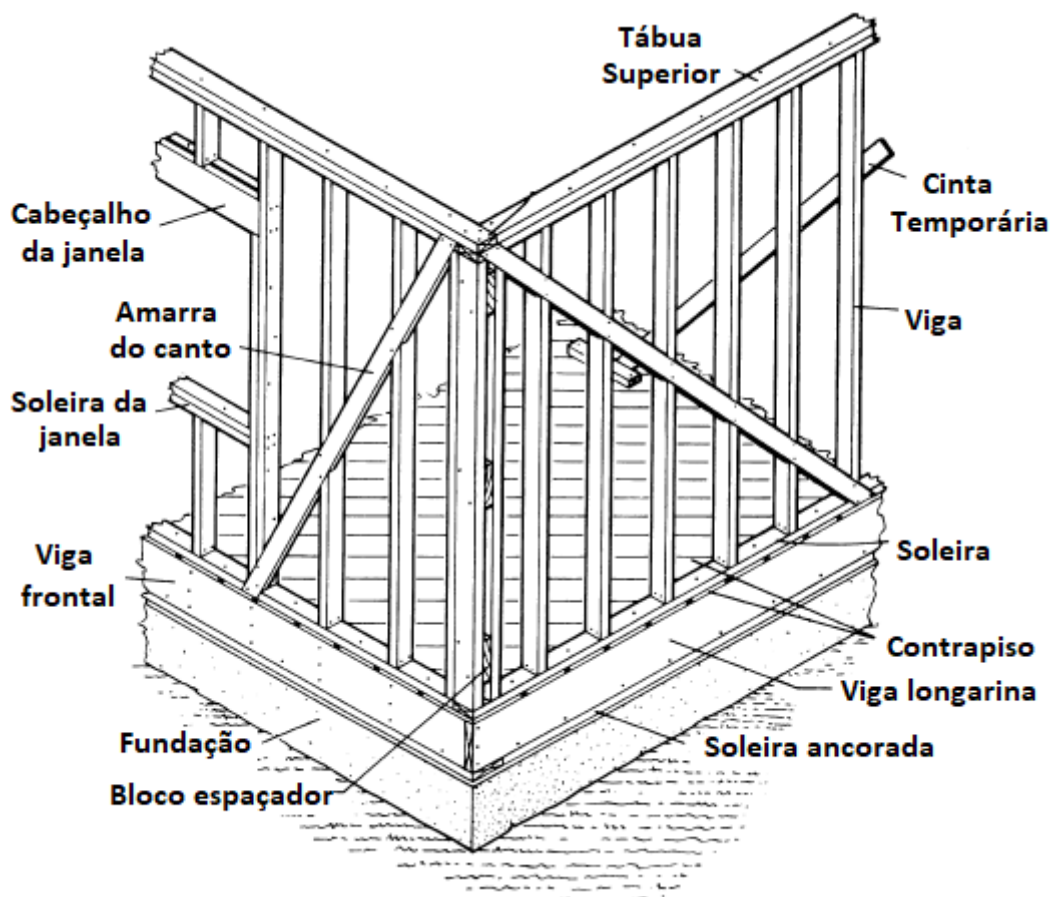
Figura 1: Exemplo de estrutura no sistema *balloon frame*.



Fonte: adaptado de ANDERSON, 1975.

Quanto ao sistema *platform frame* (sistema plataforma), segundo THALLON (2008), é o mais utilizado: os elementos verticais são interrompidos em cada pavimento, onde a base para a estrutura vertical conseguinte é o assoalho do pavimento sucessor, servindo de plataforma para a sequência da estrutura – como é mostrado na Figura 2. Uma das vantagens da utilização de *platform frame* é a padronização do sistema: é possível utilizar tanto para o pavimento térreo quanto para os outros o mesmo sistema estrutural (THALLON, 2008). Embora este método seja mais prático, Anderson (1975) explica que pode ocorrer o encolhimento das fibras da madeira entre pavimentos: o peso da estrutura age sobre vigas de madeira, das quais as fibras se estendem na posição horizontal, gerando um esmagamento sobre as mesmas. É desse esmagamento que são geradas as fissuras no revestimento, como no de alvenaria, por exemplo.

Figura 2: Exemplo de estrutura no sistema *platform frame*.



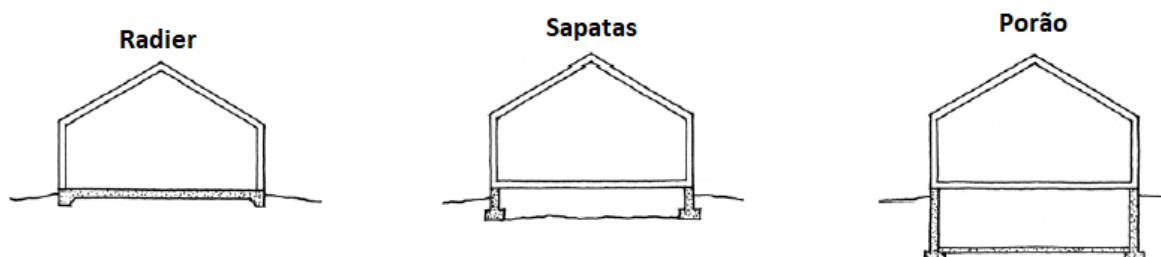
Fonte: adaptado de ANDERSON, 1975.

Thallon (2008) cita algumas das vantagens do sistema plataforma:

- a) eficiência contra o fogo;
- b) otimização da mão de obra;
- c) eficiência na construção.

Para escolher o tipo de fundação a utilizar no projeto, Anderson (1975) aconselha pesquisar os tipos de fundações utilizadas nas construções vizinhas. Segundo Thallon (2008), a fundação possui a maior parte da responsabilidade sobre a longevidade da estrutura: nenhuma edificação, por mais bem executada que seja, resistirá por muito tempo sem apresentar manifestações patológicas se a fundação não a suportar adequadamente. A escolha do tipo de fundação depende muito do clima e do tipo de solo da região, assim como dimensões e peso da estrutura (THALLON, 2008). Thallon (2008) afirma que os tipos de fundação mais utilizados nos Estados Unidos são do tipo porão, sapatas e “slab-on grade”, como mostra Figura 3:

Figura 3: Tipos de fundação utilizados no sistema wood frame.



Fonte: adaptado de THALLON, 2008.

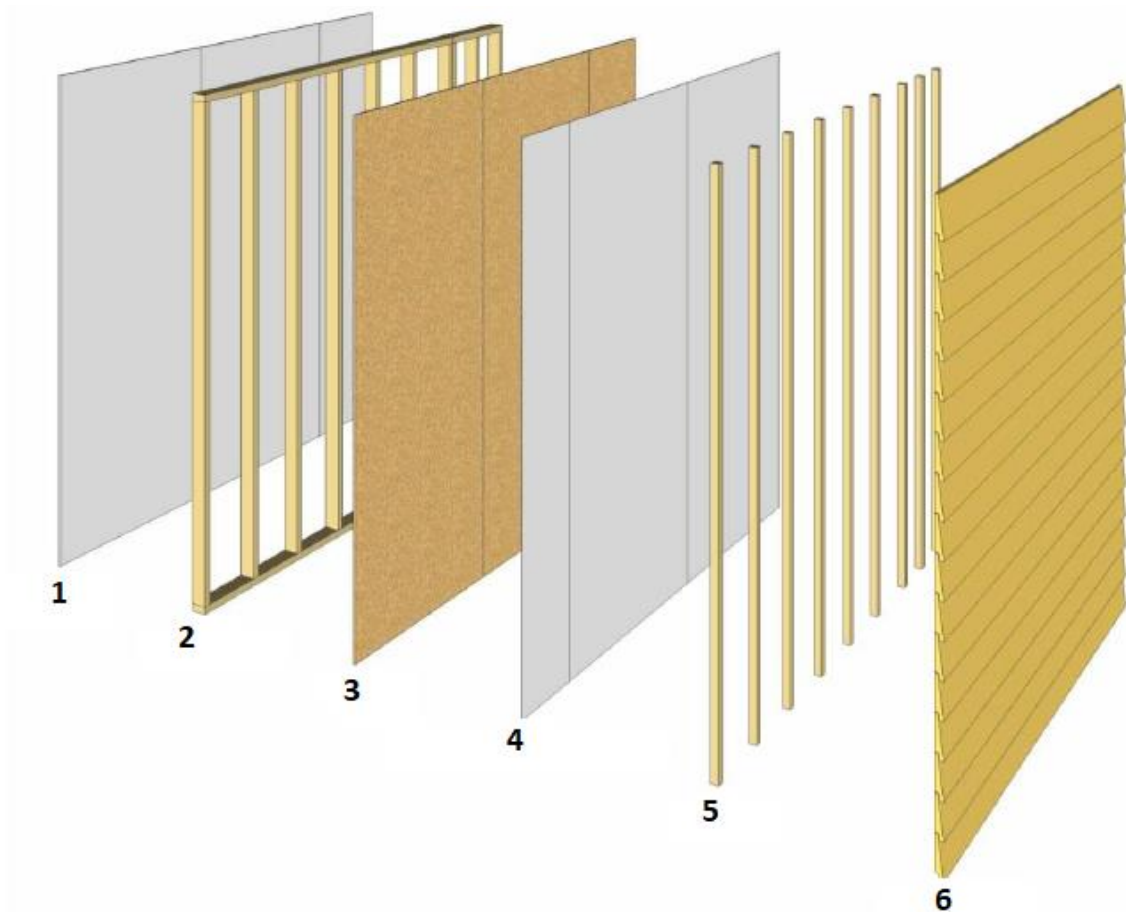
A estrutura vertical é composta por paredes sanduíche de duas camadas, constituídas de elementos verticais e horizontais de madeira reflorestada de pequenas dimensões (Krüger e Laroca, 2009 apud ARAÚJO, 2016, p.80). Para aumentar a resistência da parede e fazer a vedação da mesma são utilizados painéis OSB *Smartside Panel H* nos acabamentos externos (LP Brasil, 2011). Esses painéis possuem grande rigidez e resistência mecânica devido ao fato de serem produzidos “com tiras orientadas em três camadas cruzadas perpendiculares” (LEITE; LAHR, 2015). Espíndola (2010) afirma que é necessária a aplicação de uma camada impermeabilizante na parte externa dos painéis OSB como proteção contra intempéries: é utilizada uma camada de “uma película composta de fibras de polietileno” tipo “Tyvek”. Após a camada impermeabilizante são aplicados os “sidings”,

que também protegem a estrutura, porém tem como finalidade principal dar acabamento.

Segundo Espíndola (2010), a lista dos componentes das paredes que compõem estruturas em LWF, listados na Figura 4, são:

- 1) chapa de gesso acartonado;
- 2) estrutura;
- 3) chapa OSB;
- 4) impermeabilizante;
- 5) ripas;
- 6) *sidings*.

Figura 4: Componentes da parede externa.



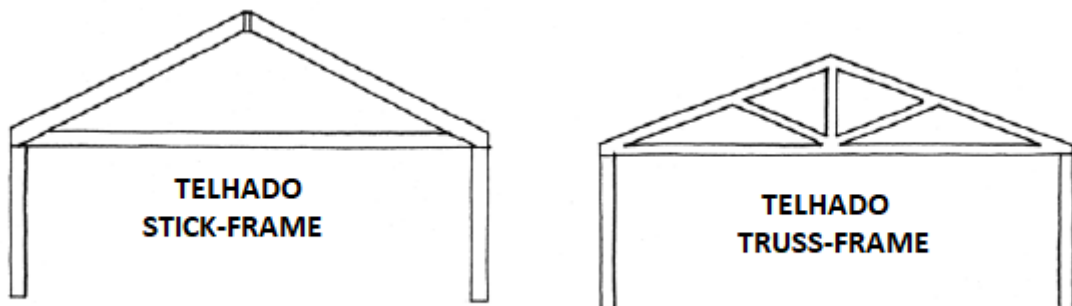
Fonte: (ESPÍNDOLA, 2010)

A escolha do formato do telhado, de acordo com Thallon (2008) e Anderson (1975), assim como a inclinação e seu tipo de estrutura, dependem de alguns fatores:

- a) escolha de revestimento, do forro e material;
- b) detalhes de beiral e impermeabilização de juntas;
- c) ventilação e proteção térmica e acústica;
- d) condições climáticas.

Os dois tipos de sistema utilizados para a construção de telhados são basicamente dois, como é mostrado na Figura 5. O sistema *stick-framed* tem como vantagens o espaço livre embaixo do telhado, que pode ser utilizado como depósito, assim como a economia de matéria e mão de obra em estruturas mais complexas e de maior porte (THALLON, 2008). Já telhados com o sistema *truss frame* podem ser muito mais extensos em comparação aos utilizados com o outro método, além de possibilitarem um vão livre muito maior. Thallon (2008) também explica que esse método pode ser mais econômico em estruturas de pequeno porte e pode ser erguido com maior agilidade.

Figura 5: Modelos de telhado.



Fonte: adaptado de ANDERSON, 1975.

2.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS

Segundo Araújo (2016), a industrialização deste processo construtivo acaba por gerar algumas vantagens em relação a outros métodos construtivos, das quais podemos citar:

- a) redução significativa de desperdícios;
- b) aumento de produtividade;
- c) produção em larga escala;
- d) obra limpa;

- e) rapidez na execução;
- f) eficiência acústica e térmica;
- g) flexibilidade da estrutura;
- h) baixo consumo de água;
- i) utilização de madeira reflorestada.

Em relação ao material utilizado é possível afirmar que, se comparada aos demais materiais utilizados na construção civil, a madeira é a que tem a melhor relação peso/resistência (PFEIL & PFEIL, 2003 apud ARAÚJO, 2016, p.79), além de ter uma produção fácil e de origem renovável (FALK, 2010 apud ARAÚJO 2016, p.79).

É possível também mencionar algumas desvantagens do sistema LWF no mercado brasileiro (LEITE; LAHR, 2015):

- a) requer mão de obra especializada (não comum no mercado brasileiro);
- b) limite de altura das edificações é de 5 pavimentos;
- c) baixa oferta de ferramentas específicas;
- d) resistência do mercado;
- e) resistência cultural.

2.3 MATERIAIS UTILIZADOS

Dentre os materiais utilizados na construção civil, como o alumínio e o aço, a madeira é o insumo que menos consome energia e que menos emite CO₂ em seu processo produtivo (MEIRELLES, 2008 apud OLIVEIRA, 2014, p.15). No Brasil, os tipos de madeira mais utilizados são Pinus e Eucalipto – devido à velocidade de reflorestamento, o Pinus é a madeira mais utilizada no país (MOLINA e CALIL, 2010). Além disso, os autores afirmam que para uma maior durabilidade do material e evitar a ocorrência de fungos e cupins, a madeira é tratada em autoclaves. Segundo Araújo (2016), alguns dos tipos de madeira mais utilizados no mundo em sistemas LWF, em geral, são:

- a) pinho;
- b) cedro;
- c) lariço;
- d) cipreste;
- e) pinheiro;

- f) abeto;
- g) cicuta;
- h) eucalipto;
- i) carvalho.

Anderson (1975) cita algumas exigências e requerimentos em relação à qualidade da madeira a ser utilizada em estruturas *light wood frame*:

- a) boa rigidez;
- b) Boa capacidade de segurar pregos;
- c) livre de partes tortas ou empenadas;
- d) facilidade de manuseio;
- e) resistência ao processo de apodrecimento.

De acordo com Leite e Lahr (2015), os painéis de OSB compõem a estrutura de contraventamento do sistema, além de vedar e dar resistência às paredes e pisos da estrutura. Algumas das características dos painéis OSB, segundo o site da LP Brasil, são:

- a) resistência a impactos e umidade;
- b) facilidade na instalação;
- c) baixa condutividade térmica;
- d) isolamento acústico;
- e) sustentabilidade;
- f) polivalência em possibilidades de acabamentos.

Figura 6: Chapa OSB.



3 NORMAS E MANUAIS DE VERIFICAÇÃO E DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento de estruturas em *light wood frame* requer normatizações para simplificar e também dar apoio jurídico para que projeta, como na Europa, onde o DIN 1052 (1998) e Eurocode 5 Parte 2 (1997) dão esse suporte (MOLINA e CALIL, 2010). Os autores também afirmam que nos Estados Unidos a norma que rege o dimensionamento de estruturas em LWF é o *Wood Frame Construction Manual*, licenciado pelo *American Wood Council* (2018): este considera o comportamento das estruturas como placas ou chapas, ou seja, não dimensiona os elementos da estrutura separadamente mas sim em conjunto. Já no Brasil, a única norma relacionada a estruturas em madeira é a NBR 7190:1977, a qual é utilizada para o “dimensionamento das peças estruturais individuais de madeira” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 1997).

Para o dimensionamento de estruturas é necessário considerar ações como cargas acidentais verticais, disponíveis na NBR 6120:2019 – Ações Para o Cálculo de Estruturas de Edificações, assim como forças horizontais devido ao vento, cujos cálculos e considerações são encontrados na NBR 6123:1988 – Forças Devido ao Vento em Edificações.

As forças e cargas exercidas sobre a estrutura serão baseadas conforme as prescrições da NBR 6120:2019, de ações para o cálculo de estruturas de edificações. Serão levados em conta valores de cargas acidentais e cargas variáveis, especificados nesta norma, para estruturas residenciais. Outra norma que será utilizada para determinação de forças sobre a estrutura é a NBR 6123:1988 (forças devido ao vento em edificações). Esta traz todas as especificações e métodos de cálculo para determinar as forças laterais exercidas na edificação. Segundo a norma NBR 6123, para a utilização dos parâmetros serão considerados (ABNT,1988):

- a) Edificação localizada na região Nordeste do Rio Grande do Sul;
- b) terreno fracamente acidentado;
- c) rugosidade do terreno de categoria IV;
- d) edificação de Classe A (não excede 20 m de altura).

O WFCM (2018) considera ventos no sistema *3-second gust*, onde é levado em consideração a média das maiores rajadas de vento medidas no intervalo de três

segundos, mesmo sistema de medição utilizado na NBR 6123:1988, utilizada neste trabalho.

3.1 WOOD FRAME CONSTRUCTION MANUAL

A primeira edição do *Wood Frame Construction Manual* se deu em 1995 e desde então estuda e avança nas técnicas construtivas em *light wood frame*, tendo nos anos seguintes lançado novas edições revisadas (WFCM, 2018). A versão desta norma a ser utilizada no presente trabalho fornece informações técnicas sobre o design para estruturas de até duas moradias. Todas as cargas, incluindo vento, neve, carga viva e sísmica são baseadas nas considerações de outra norma americana, a ASCE 7-16 *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (WFCM, 2018), que especifica os critérios e cargas mínimas para o dimensionamento de edificações e outras construções.

Como consta no *Wood Frame Construction Manual* (2018), são fornecidas descrições de dimensionamento e informações sobre:

- a) cargas e resistência;
- b) limitações de aplicabilidade;
- c) detalhes construtivos;
- d) soluções prescritivas de casos específicos;
- e) opções estruturais;
- f) relações entre cargas e resistências.

3.1.1 Descrição sobre as disposições estruturais

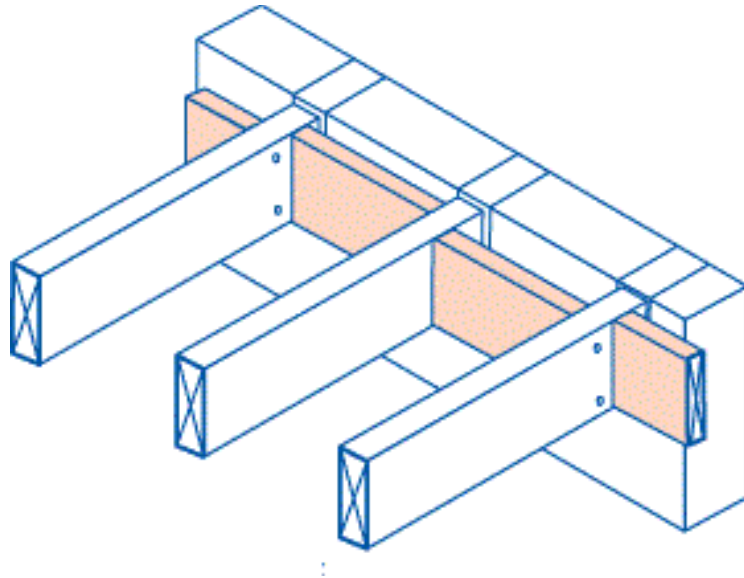
Como é especificado no WFCM (2018), as vigas das lajes devem estar de acordo com as tabelas 3.18 A-B do *Wood Frame Construction Manual*, as quais mostram o espaçamento entre vigas a ser utilizado e tamanho do vão, dependendo do tipo de madeira e da carga acidental aplicada.

Quanto a estabilidade lateral, o WFCM (2018) estabelece algumas regras para evitar o deslocamento lateral e rotação da estrutura, das quais levam em relação a proporção entre profundidade e amplitude (d/h):

- a) ($d/h \leq 2$); não há a necessidade de suporte lateral.

- b) ($2 < d/h \leq 4$); as pontas devem ser mantidas em posição por meio de bloqueamentos (elementos sólidos) em sua largura por completo, como é mostrado na Figura 7:

Figura 7: Exemplo de bloqueamento nas vigas.



Fonte: NHBC (2010).

- c) ($4 < d/h \leq 5$); para evitar deslocamento lateral a borda de compressão do membro deve estar presa em linha por todo seu comprimento.
- d) ($5 < d/h \leq 6$); bloqueamentos ou contraventamentos diagonais devem ser instalados com intervalos de no mínimo 2,5 metros; a linha de compressão deve ser mantida alinhada, e as pontas devem ser mantidas em posição.
- e) ($6 < d/h \leq 7$); ambas pontas do membro devem ser mantidas alinhadas por toda a sua extensão e todas as extremidades das vigas ligadas a pontos de suporte devem ser mantidas em posição por elementos sólidos.

As paredes com vigas (*stud wall*) deverão ter intervalos e espaçamentos máximos de acordo com as tabelas 3.20A-B e 3.20C do WFCM (2018). Também é estabelecido que:

- a) a altura limite da construção será de 4,30 m se forem aplicadas vigas com medidas de 5x10 cm nas paredes exteriores;

- b) a altura limite da construção será de 6,0 m se forem aplicadas vigas com medidas de 5x15 ou 5x20 cm nas paredes exteriores;
- c) furos e entalhes não poderão se localizar no terço médio do comprimento da viga;
- d) entalhes nos outros terços da viga não deverão exceder mais que 25% da largura da viga;
- e) furos não deverão exceder 40% da largura da viga e deverão estar no mínimo 1,6 cm distantes da ponta da viga.

Outras descrições e detalhes de dimensionamento de paredes se encontram no item 3.4 do *Wood Frame Construction Manual* (2018).

3.2 NBR 7190:1997 – PROJETO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA

O objetivo principal da NORMA NBR 7190 é assegurar “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). A Norma contém prescrições e recomendações sobre:

- a) hipóteses básicas de segurança;
- b) carregamentos;
- c) cargas acidentais e permanentes;
- d) estados limites últimos;
- e) propriedades das madeiras;
- f) ligações das peças;
- g) estados limites de utilização;
- h) disposições construtivas.

3.2.1 Resistência à tração

Segundo a norma NBR 7190, “a segurança das peças estruturais de madeira em relação a estados limites últimos não deve depender diretamente da resistência à tração normal às fibras do material” e é estabelecida como condição de segurança para barras tracionadas axialmente a fórmula expressa por (ABNT, 1997):

$$\sigma_{td} \leq f_{td}$$

Onde:

σ_{td} = tensão de cálculo, obtida pela divisão da força de tração de dimensionamento pela área útil da seção transversal;

f_{td} = resistência de cálculo, expressa pela fórmula abaixo:

$$f_{td} = k_{mod} * \frac{f_{t,k}}{\gamma_w}$$

O coeficiente de minoração (γ_w) para tração paralela às fibras tem valor de 1,8 e é adimensional.

O valor de (k_{mod}) é obtido através da seguinte expressão:

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

(k_{mod1}) representa a classe de carregamento, conforme Tabela 1.

(k_{mod2}) é o valor da classe de umidade, conforme Tabela 2.

De acordo com a NBR 7190:1997, o coeficiente (k_{mod3}) depende do tipo da madeira utilizada em relação à sua qualidade. Para madeira de primeira categoria (isenta de defeitos), segundo a Norma, utiliza-se o valor de 1,0 para o coeficiente (k_{mod3}). Já para madeiras de segunda categoria, utiliza-se o valor de 0,80.

O valor de ($f_{t,k}$) pode ser conferido no Anexo E da NBR 7190, e representa o valor de resistência em duas situações:

(f_{t0}) = resistência à tração paralela às fibras;

(f_{t90}) = resistência à tração normal às fibras.

Tabela 1: Classes de carregamento.

Classe de Carregamento	Madeira Serrada	Madeira Laminada
	Colada	Madeira Recompоста
	Madeira Compensada	
Permanente	0,6	0,3
Longa Duração	0,7	0,45
Média Duração	0,8	0,65
Curta Duração	0,9	0,9
Instantânea	1,1	1,1

Fonte: o autor (2020).

Tabela 2: Classes de umidade.

Classe de umidade	Madeira Serrada	Madeira recomposta
	Madeira Laminada Colada Madeira Compensada	
(1) e (2)	10	1
(3) e (4)	0,8	0,9

Fonte: o autor (2020).

3.2.2 Resistência à compressão

A norma NBR 7190 estabelece que peças curtas são definidas pelo índice de esbeltez ($\lambda \leq 40$), que “na situação de projeto são admitidas como solicitadas apenas à compressão simples, dispensa-se a consideração de eventuais efeitos de flexão” (ABNT, 1997). Sendo assim:

$$\sigma_{Nd} \leq f_{c,d}$$

Onde:

σ_{Nd} = valor de cálculo da tensão de compressão devida à força normal de compressão

$f_{c,d}$ = resistência à compressão da madeira.

As peças medianamente esbeltas são definidas pelo índice de esbeltez ($40 < \lambda \leq 80$), as quais são “submetidas na situação de projeto à flexocompressão com os esforços de cálculo (N_d) e (M_{1d})”, conforme item 7.5.4 da NBR 7190 (ABNT, 1997). Além disso, deve ser verificada a segurança em relação ao estado limite último de instabilidade, verificação essa atendida se for respeitada a condição

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{c,d}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{c,d}} \leq 1$$

Onde

σ_{Nd} = valor de cálculo da tensão de compressão devida à força normal de compressão

σ_{Md} = valor de cálculo da tensão de compressão devida ao momento fletor (M_d), cuja expressão é:

$$M_d = N_d * e_d$$

As equações de (N_d) e (e_d) se encontram no item 7.5.4 da NBR 7190.

Para as peças esbeltas, definidas pelo índice de esbeltez ($\lambda > 80$), a fórmula de verificação é a mesma utilizada para as peças medianamente esbeltas, mudando apenas as equações para os valores de (N_d) e (e_d) , as quais se encontram no item 7.5.4 da NBR 7190 (ABNT, 1997).

3.2.3 Resistência à flexão

De acordo com a norma NBR 7190 (ABNT, 1997), para as peças fletidas, o vão a ser considerado deve ser o menor entre as seguintes opções:

- a) Distância entre eixos dos apoios;
- b) o vão livre acrescido da altura da seção transversal da peça no meio do vão, não se considerando acréscimo maior que 10 cm.

Nos elementos submetidos a “momento fletor cujo plano de ação contém um eixo central de inércia da seção transversal resistente” a segurança é atendida pela verificação simultânea de

$$\sigma_{c1,d} \leq f_{cd}$$

$$\sigma_{t2,d} \leq f_{td}$$

onde (f_{cd}) é a resistência à compressão e (f_{td}) é a resistência à tração.

$(\sigma_{c1,d})$ é a tensão atuante de cálculo na borda mais comprimida da seção transversal considerada, obtida por

$$\sigma_{c1,d} = \frac{M_d}{W_c}$$

e $(\sigma_{t2,d})$ é a tensão atuante de cálculo na borda mais tracionada da seção transversal considerada, obtida por

$$\sigma_{t2,d} = \frac{M_d}{W_t}$$

dos quais (W_c) e (W_t) são os respectivos módulos de resistência, cujas fórmulas se encontram no item 7.3.3 da NBR 7190 (ABNT, 1997).

3.2.4 Resistência ao cisalhamento

A norma NBR 7190 (ABNT, 1997) estabelece que a condição de segurança para vigas submetidas à flexão com força cortante é atendida através da expressão

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

onde

(τ_d) representa a “máxima tensão de cisalhamento atuando no ponto mais solicitado da peça” para uma seção retangular, e é obtida por

$$\tau_d = \frac{3}{2} * \frac{V_d}{b * h}$$

da qual (V_d) é a força cortante aplicada na peça.

Para os valores de ($f_{v0,d}$) admite-se:

Coníferas: $f_{v0,d} = 0,12 * f_{c0,d}$

Dicotiledôneas: $f_{v0,d} = 0,10 * f_{c0,d}$

3.2.5 Deformações limites

A verificação da segurança em relação ao estado limite das deformações deve ser feita de acordo com o item 9.2.1 da norma NBR 7190, da qual estabelece que apenas combinações de carga de longa duração devem ser consideradas para tal (ABNT, 1997).

Segundo consta na Norma Brasileira, “a soma das parcelas devidas à carga permanente e à carga acidental” resultam na flecha efetiva, sendo que esta não deve ser maior que 1/200 dos vãos (ABNT NBR 7190, 1997, p. 39). Além disso, o valor da flecha efetiva não deve superar 1/100 do comprimento dos balanços correspondentes (NBR 7190:1997).

4 METODOLOGIA

O presente trabalho visa analisar e dimensionar uma edificação residencial de dois pavimentos em *wood frame*. O pré-dimensionamento será feito utilizando a norma americana *Wood Frame Construction Manual* (2018) e a verificação dos esforços na estrutura através da Norma Brasileira para projetos de estruturas de madeira, a NBR 7190:1997. A edificação será composta por uma estrutura em *wood frame* construída com o sistema *platform frame* (sistema plataforma), o qual possui maior popularidade atualmente. As fundações, cujo dimensionamento não será estudado, serão compostas por sapatas corridas na residência e por radier na garagem. A construção do telhado será feita com o sistema *truss frame* devido à sua agilidade de execução e à sua capacidade de proporcionar estruturas com vãos maiores. Em relação ao contraventamento da estrutura, como citado anteriormente, será feito através de chapas OSB, das quais irão compor também pisos e forros.

A edificação de dois pavimentos a ser utilizada para o dimensionamento tem 140 m² de área construída e será composta de:

- a) Dois banheiros;
- b) um lavatório;
- c) três dormitórios;
- d) cozinha integrada com a sala de estar;
- e) garagem para dois automóveis.

Quanto ao tipo de madeira, será utilizado o *Pinus Elliottii*, tendo em vista que é facilmente encontrado tanto no mercado brasileiro quanto nos mercados europeu e norte americano. Juntamente com a espécie do gênero *Eucalyptus*, o *Pinus* é largamente utilizado para reflorestamento comercial. Além do mais, esse é um dos tipos de madeira utilizados para o dimensionamento de estruturas no *Wood Frame Construction Manual* (2018), o que possibilita o uso da norma americana para o pré-dimensionamento da estrutura composta por esta espécie de madeira.

A estrutura, baseada no projeto arquitetônico escolhido, será dimensionada conforme as especificações e prescrições do *Wood Frame Construction Manual* (2018), as quais são dadas em tabelas e são definidas conforme os parâmetros definidos anteriormente, como cargas máximas e velocidades de vento, por exemplo.

Alguns dos principais detalhes estruturais a serem definidos pela norma americana são:

- a) Dimensões e seção dos elementos de madeira a serem utilizados;
- b) espaçamentos entre elementos de madeira;
- c) dimensões máximas de aberturas;
- d) dimensões do diafragma da estrutura.

Ao passo em que é pré-dimensionada, a estrutura será moldada no programa computacional Revit, tendo representações em duas e três dimensões.

Tendo o pré-dimensionamento pronto, se dará o início à verificação dos esforços na edificação utilizando a norma brasileira NBR 7190:1997 para estruturas construídas em madeira. A madeira a ser considerada para os cálculos será o *Pinus Elliottii*, como no pré-dimensionamento. Nesta etapa serão conferidos os esforços de resistência à tração, compressão, flexão e cisalhamento dos elementos que compõem a estrutura. Para tal verificação, será utilizado o *software* computacional SCIA Engineer, do Nemetscheck Group, no qual pode-se moldar a estrutura e verificar as ações exercidas na mesma de acordo com o material e norma a serem utilizados.

5 ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO

5.1 PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO

Primeiramente, a fim de obter as informações necessárias para o dimensionamento da estrutura conforme a norma americana (WFCM), após já se ter as informações arquitetônicas, é necessário a determinação de carregamentos e ações exercidas sobre a edificação, conforme especificado na NBR 6120 (ABNT, 2019) de ações para o cálculo de estruturas e edificações.

De acordo com a norma brasileira, as cargas variáveis e seus valores característicos utilizados para edificações residenciais, mostrados na Tabela 3, são:

Tabela 3: Cargas variáveis.

Local	Carga uniformemente distribuída (kN/m²)
Dormitórios	1,5
Cozinha	1,5
Sala	1,5
Banheiro	1,5
Área de serviço	2
Lavanderia	2

Fonte: o autor (2020).

As cargas atuantes no piso da garagem não serão consideradas, pois a mesma possui piso inteiramente apoiado sobre fundação do tipo radier, o qual não é o foco deste trabalho. Sendo assim, não haverá qualquer consideração de dimensionamento do mesmo.

A norma NBR 6120 (ABNT, 2019) também estabelece os valores nominais dos pesos de componentes construtivos. Neste caso, foram utilizados os valores de componentes como chapas OSB, piso de porcelanato, forro de gesso acartonado e telhas cerâmicas, conforme apresentado na Tabela 4. Os valores fornecidos em kN/m³ do porcelanato e da chapa OSB foram convertidos para kN/m² de acordo com a

espessura dos materiais utilizados. A espessura considerada para o porcelanato e para as chapas OSB são, respectivamente, de 11,8 mm e 11 mm.

Tabela 4: Peso dos componentes construtivos.

Material	Peso específico aparente (kN/m²)
Telha cerâmica	0,45
Chapa OSB	0,077
Gesso acartonado	0,25
Porcelanato	0,27

Fonte: o autor (2020).

Para determinar o peso específico da madeira utilizada que compõe a estrutura, o Pinus Elliotti, foi utilizado o valor fornecido na NBR 7190:1997, o qual corresponde a 560 kg/m³.

Os valores das ações devido ao vento utilizados foram obtidos na NBR 6123:1988 de forças devido ao vento em edificações, baseados em dados geográficos de um bairro residencial localizado em Caxias do Sul-RS. A velocidade básica do vento adotada para os cálculos é de 45 m/s. O fator topográfico S1, que neste caso leva em consideração um relevo de terreno fracamente acidentado, tem valor igual a 1,0. Para o fator S2, o valor encontrado é de 0,92, (por simplificação foi adotado a valor de z igual a maior altura da edificação), e os itens levados em conta são:

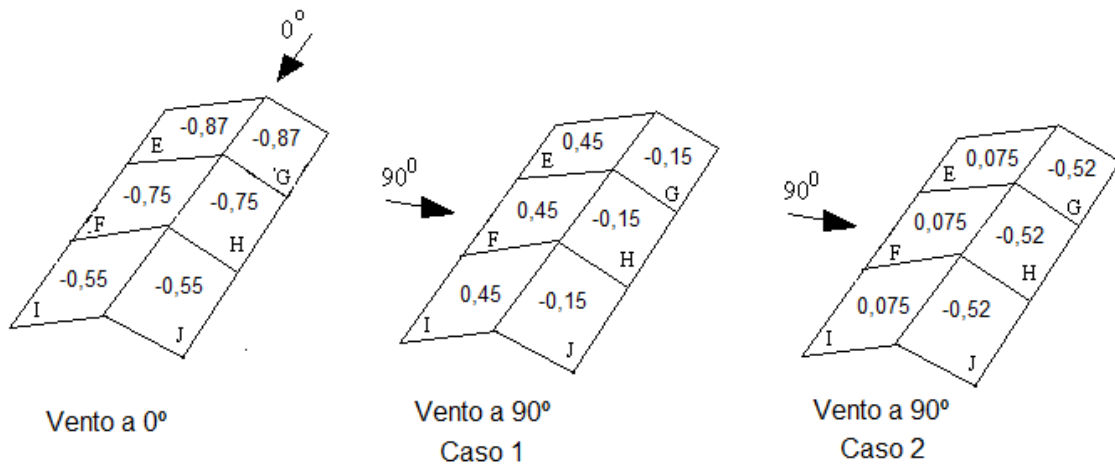
- a) Rugosidade do terreno: categoria III, de terrenos ondulados com distância considerável do centro da cidade e obstáculos de cota média igual a 3 metros;
- b) dimensões da edificação: dimensão horizontal não superior a 20 m (classe A).

Para o fator estatístico S3 o valor considerado é de 1,0, próprio para edificações residenciais. Este fator considera a vida útil e o grau de segurança da edificação.

Tendo os valores e dados citados acima, é possível obter os valores dos coeficientes de forma atuantes na cobertura da edificação de acordo com o item 4.2.2 da NBR 6123:1988 e com o auxílio do programa computacional VisualVentos, da

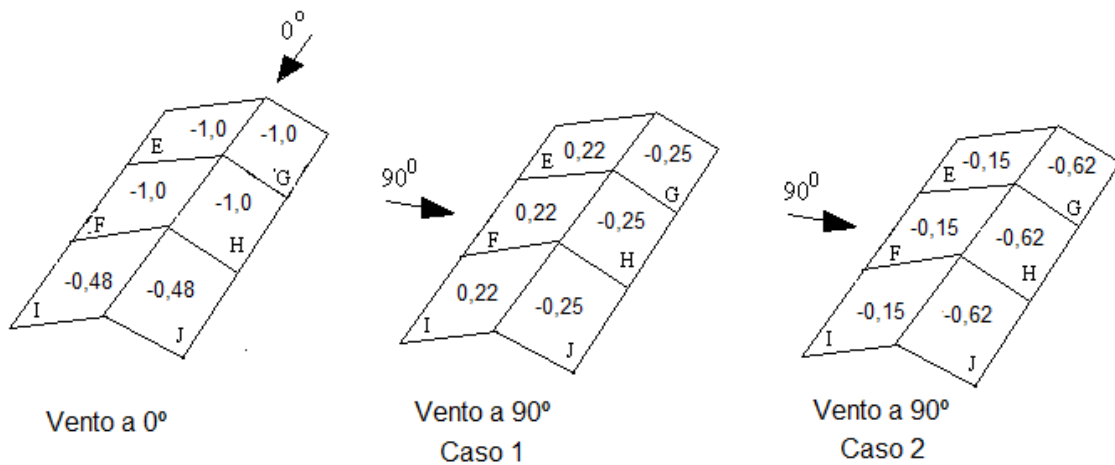
Universidade de Passo Fundo (UPF). A pressão exercida na estrutura da cobertura é obtida de acordo com o item 4.2.C da norma NBR 6123 (ABNT, 1988). Os valores encontrados, em kN/m², estão explícitos nas Figuras 8 e 9:

Figura 8: Pressão exercida na cobertura da garagem (kN/m²).



Fonte: o autor (2020).

Figura 9: Pressão exercida na cobertura da residência (kN/m²).



Fonte: o autor (2020).

5.2 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

Para o dimensionamento da estrutura foi utilizada a madeira identificada no WFCM (2018) como *Southern Pine*, cujo tipo de madeira é equivalente ao *Pinus Elliotti* brasileiro. A classe adotada dentre as quatro opções fornecidas no WFCM para este tipo de madeira em específico é a *Select Structural (SS)*, de alta qualidade e indicada para construções que requerem alta rigidez e resistência. Todas as medidas e dimensões na norma americana estão apresentadas no sistema imperial e foram convertidas para o sistema métrico neste trabalho. As escolhas da seção dos elementos e do espaçamento entre os mesmos se dá pela relação entre tipo de material e cargas e ações atuantes na estrutura, fornecidas por meio de tabelas, conforme mostrado na Figura 10. As tabelas citadas no item de Concepção Estrutural deste trabalho são provenientes do *Wood Frame Construction Manual (2018)*. Todas ações e cargas utilizadas para a escolha dos elementos são as mesmas descritas anteriormente.

Figura 10: Exemplo de tabela utilizada para escolha de parâmetros de vigas secundárias.

		Dead Load = 10 psf				Dead Load = 20 psf				
		2x6	2x8	2x10	2x12	2x6	2x8	2x10	2x12	
Maximum Floor Joist Spans ¹										
Joist Spacing	Species and Grade	(ft-in.)	(ft-in.)	(ft-in.)	(ft-in.)	(ft-in.)	(ft-in.)	(ft-in.)	(ft-in.)	
12 in.	Douglas Fir-Larch	SS	12 - 6	16 - 6	21 - 0	25 - 7	12 - 6	16 - 6	21 - 0	25 - 7
	Douglas Fir-Larch	No.1	12 - 0	15 - 10	20 - 3	24 - 8	12 - 0	15 - 7	19 - 0	22 - 0
	Douglas Fir-Larch	No.2	11 - 10	15 - 7	19 - 10	23 - 4	11 - 8	14 - 9	18 - 0	20 - 11
	Douglas Fir-Larch	No.3	9 - 11	12 - 7	15 - 5	17 - 10	8 - 11	11 - 3	13 - 9	16 - 0
	Hem-Fir	SS	11 - 10	15 - 7	19 - 10	24 - 2	11 - 10	15 - 7	19 - 10	24 - 2
	Hem-Fir	No.1	11 - 7	15 - 3	19 - 5	23 - 7	11 - 7	15 - 3	18 - 9	21 - 9
	Hem-Fir	No.2	11 - 0	14 - 6	18 - 6	22 - 6	11 - 0	14 - 4	17 - 6	20 - 4
	Hem-Fir	No.3	9 - 8	12 - 4	15 - 0	17 - 5	8 - 8	11 - 0	13 - 5	15 - 7
	Southern Pine	SS	12 - 3	16 - 2	20 - 8	25 - 1	12 - 3	16 - 2	20 - 8	25 - 1
	Southern Pine	No.1	11 - 10	15 - 7	19 - 10	24 - 2	11 - 10	15 - 7	18 - 7	22 - 0
	Southern Pine	No.2	11 - 3	14 - 11	18 - 1	21 - 4	10 - 9	13 - 8	16 - 2	19 - 1
	Southern Pine	No.3	9 - 2	11 - 6	14 - 0	16 - 6	8 - 2	10 - 3	12 - 6	14 - 9
	Spruce-Pine Fir	SS	11 - 7	15 - 3	19 - 5	23 - 7	11 - 7	15 - 3	19 - 5	23 - 7
	Spruce-Pine Fir	No.1	11 - 3	14 - 11	19 - 0	23 - 0	11 - 3	14 - 7	17 - 9	20 - 7
	Spruce-Pine Fir	No.2	11 - 3	14 - 11	19 - 0	23 - 0	11 - 3	14 - 7	17 - 9	20 - 7
	Spruce-Pine Fir	No.3	9 - 8	12 - 4	15 - 0	17 - 5	8 - 8	11 - 0	13 - 5	15 - 7
16 in.	Douglas Fir-Larch	SS	11 - 4	15 - 0	19 - 1	23 - 3	11 - 4	15 - 0	19 - 1	23 - 3
	Douglas Fir-Larch	No.1	10 - 11	14 - 5	18 - 5	21 - 4	10 - 8	13 - 6	16 - 5	19 - 1
	Douglas Fir-Larch	No.2	10 - 9	14 - 2	17 - 5	20 - 3	10 - 1	12 - 9	15 - 7	18 - 1
	Douglas Fir-Larch	No.3	8 - 7	10 - 11	13 - 4	15 - 5	7 - 8	9 - 9	11 - 11	13 - 10
	Hem-Fir	SS	10 - 9	14 - 2	18 - 0	21 - 11	10 - 9	14 - 2	18 - 0	21 - 11
	Hem-Fir	No.1	10 - 6	13 - 10	17 - 8	21 - 1	10 - 6	13 - 4	16 - 3	18 - 10
	Hem-Fir	No.2	10 - 0	13 - 2	16 - 10	19 - 8	9 - 10	12 - 5	15 - 2	17 - 7
	Hem-Fir	No.3	8 - 5	10 - 8	13 - 0	15 - 1	7 - 6	9 - 6	11 - 8	13 - 6
	Southern Pine	SS	11 - 2	14 - 8	18 - 9	22 - 10	11 - 2	14 - 8	18 - 9	22 - 10
	Southern Pine	No.1	10 - 9	14 - 2	18 - 0	21 - 4	10 - 9	13 - 9	16 - 1	19 - 1
	Southern Pine	No.2	10 - 3	13 - 3	15 - 8	18 - 6	9 - 4	11 - 10	14 - 0	16 - 6
Southern Pine	No.3	7 - 11	10 - 0	12 - 1	14 - 4	7 - 1	8 - 11	10 - 10	12 - 10	

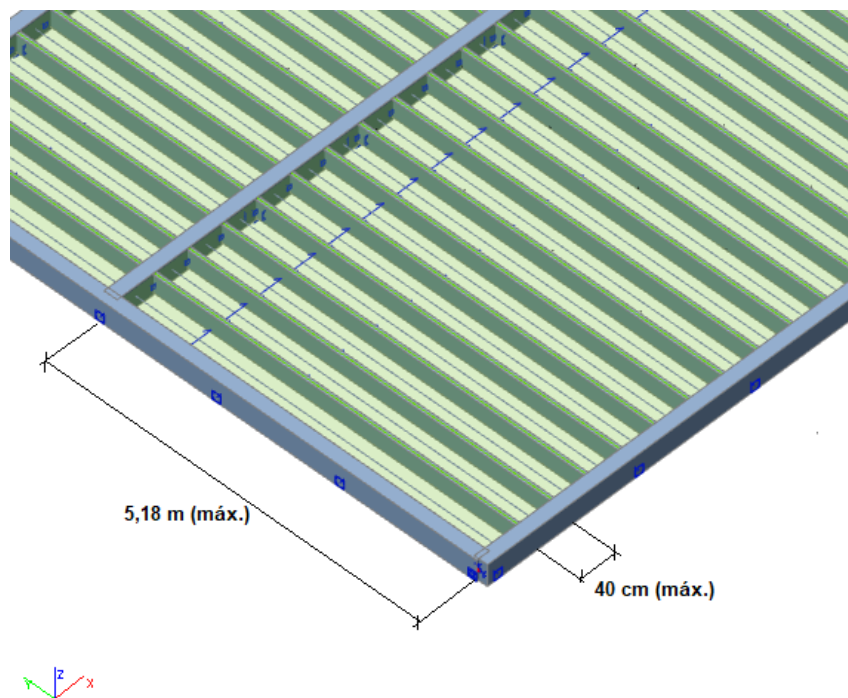
Fonte: WFCM, 2018 (adaptado).

A estrutura da residência é apoiada por sapata corrida ao longo das vigas principais, enquanto a garagem é inteiramente apoiada sobre sapata do tipo radier.

5.2.1 Pavimentos

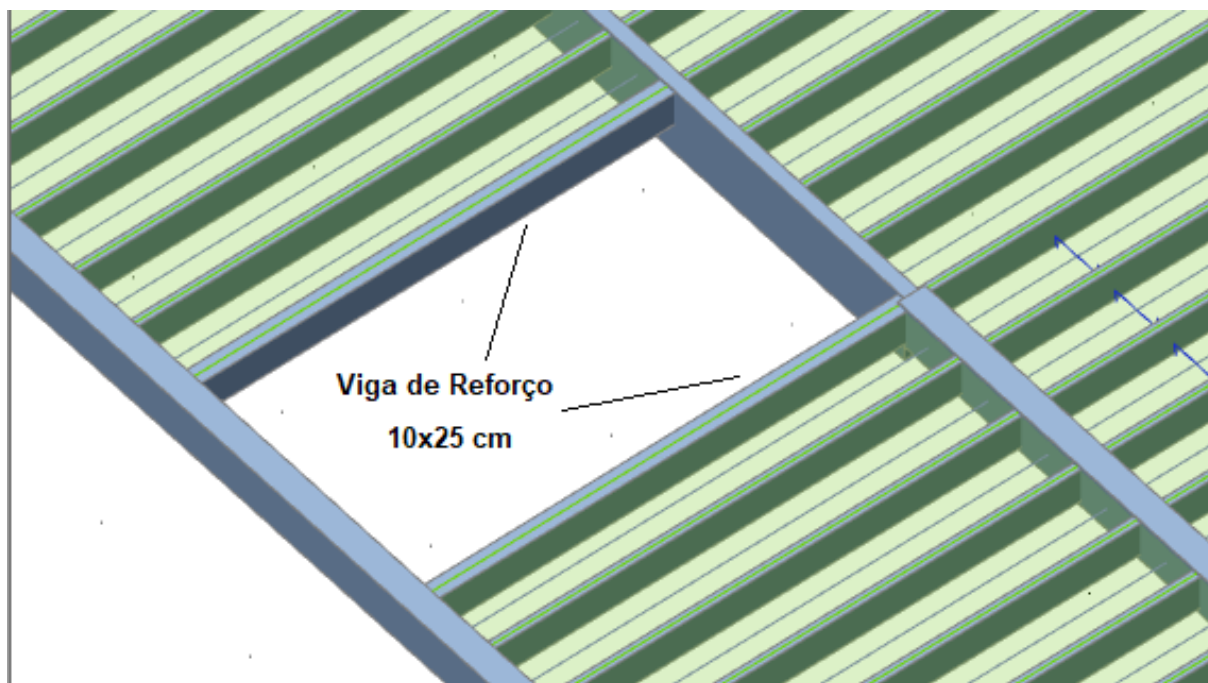
A estrutura dos pavimentos constitui de dois tipos de vigas, as vigas principais e secundárias. As vigas principais, de acordo com a tabela 3.22B2 do WFCM (2018) devem ser formadas por três tábuas coladas uma a outra. Porém, neste trabalho, optou-se por usar apenas uma peça com dimensão equivalente a três tábuas iguais às das vigas secundárias unidas, para facilitar a modelagem e análise da estrutura no software *SCIA Engineer*. Ou seja, onde antes eram três tábuas de 5x30 cm unidas, resultou-se em apenas um elemento de seção de 15x30 cm. Já as vigas secundárias, compostas de um único elemento, possuem seção de 5x25 cm e um vão máximo de 5,18 metros, em concordância com a tabela 3.18A (o maior vão utilizado neste projeto é de 4,20 m). A estrutura do pavimento é constituída pelas vigas secundárias e deve ter um espaçamento máximo de 40 cm (Figura 11) entre as peças, conforme selecionado na tabela 3.18A.

Figura 11: Estrutura do pavimento térreo.



Ambos, térreo e primeiro pavimentos, são compostos de elementos com medidas e espaçamentos idênticos, com exceção ao vão da escada criado na estrutura do primeiro pavimento. Este mesmo foi reforçado estruturalmente, onde duplicou-se a largura da viga secundária, conforme mostrado na Figura 12.

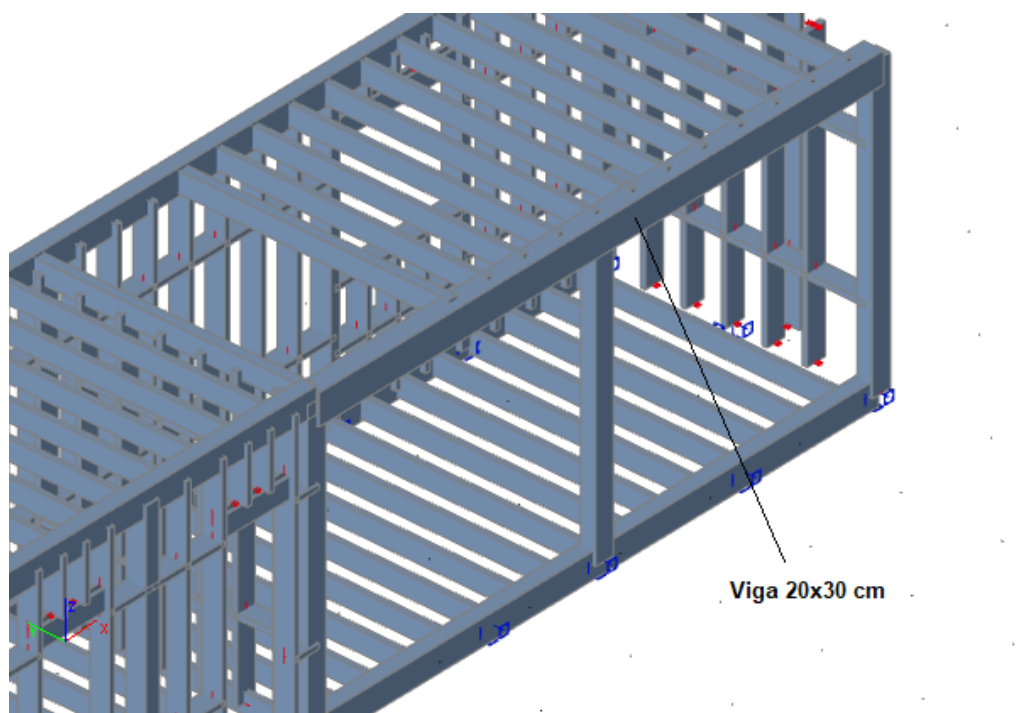
Figura 12: Vigas de reforço no vão da escada.



Fonte: o autor (2020).

A linha da viga principal no centro do primeiro pavimento é apoiada linearmente em 5,65 m de sua extensão, restando um vão de 6,20 m, com apoios em suas extremidades e em seu centro. Sendo assim, de acordo com a tabela 3.24A2 do WFCM (2018), a seção da viga a ser adotada nos vãos livres de 3,10 m deve ser de 20x30 cm para suportar a carga, conforme ilustrado na Figura 13. Detalhe: o WFCM (2018) pede que a viga seja composta de quatro tábuas unidas, de seção 5x30 cm. Para simplificar a moldagem da estrutura, optou-se por um elemento único de seção 20x30 cm.

Figura 13: Viga com medida especial.

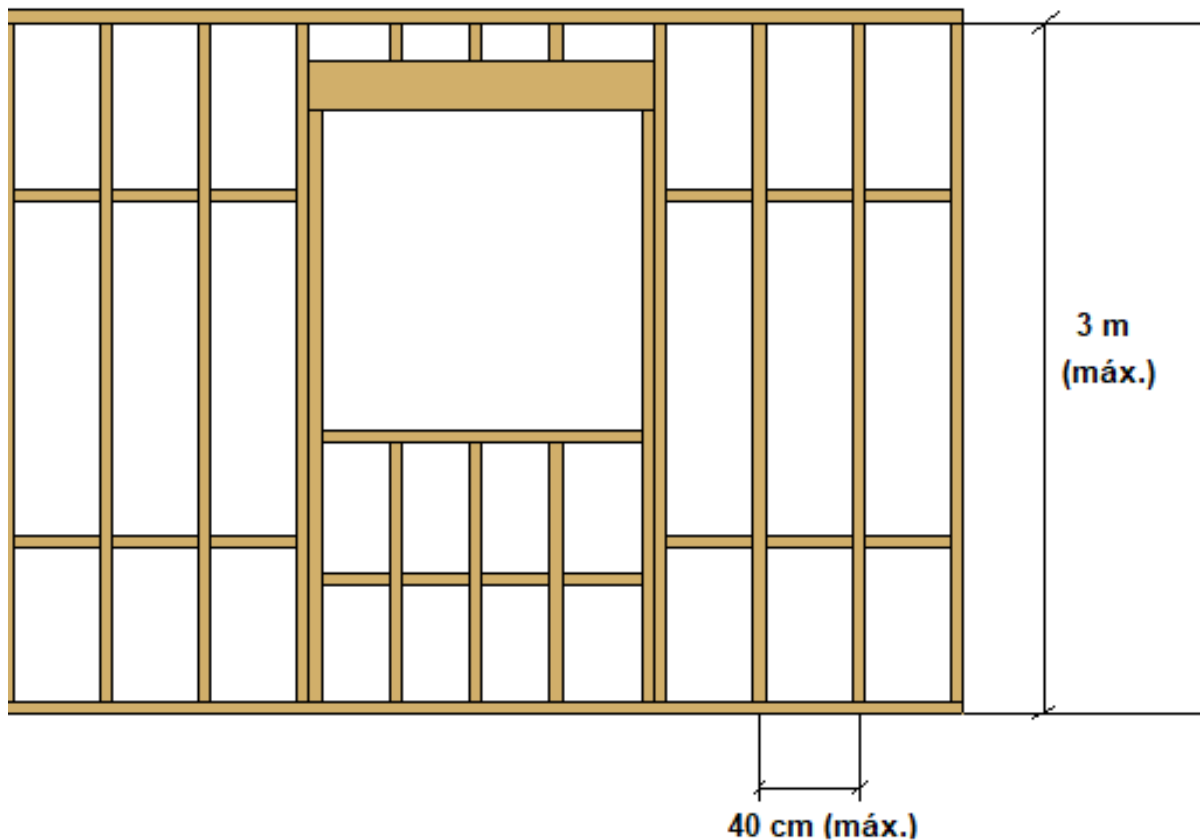


Fonte: o autor (2020).

5.2.2 Paredes

Os elementos que compõem a estrutura das paredes são basicamente os pilares de canto, os pilares secundários, os travamentos horizontais e reforços nos vãos de aberturas. Assim como nas vigas principais, os pilares principais devem ser compostos de três tábuas unidas, portanto, para a modelagem da estrutura optou-se se por usar apenas uma peça com dimensão equivalente a três tábuas das colunas secundárias coladas, novamente para favorecer a análise no software. A seção escolhida para as tábuas das vigas secundárias é de 5x20 cm, das quais o espaçamento máximo entre as mesmas é de 40 cm (do centro), de acordo com a tabela 3.20C do WFCM (2018) e cujo comprimento máximo do elemento é de 3 m, conforme tabela 3.20C do *Wood Frame Construction Manual*, ambos ilustrados na Figura 14. O dimensionamento das paredes foi realizado apenas para as paredes que sofrem carregamentos, paredes de divisórias não estão em questão.

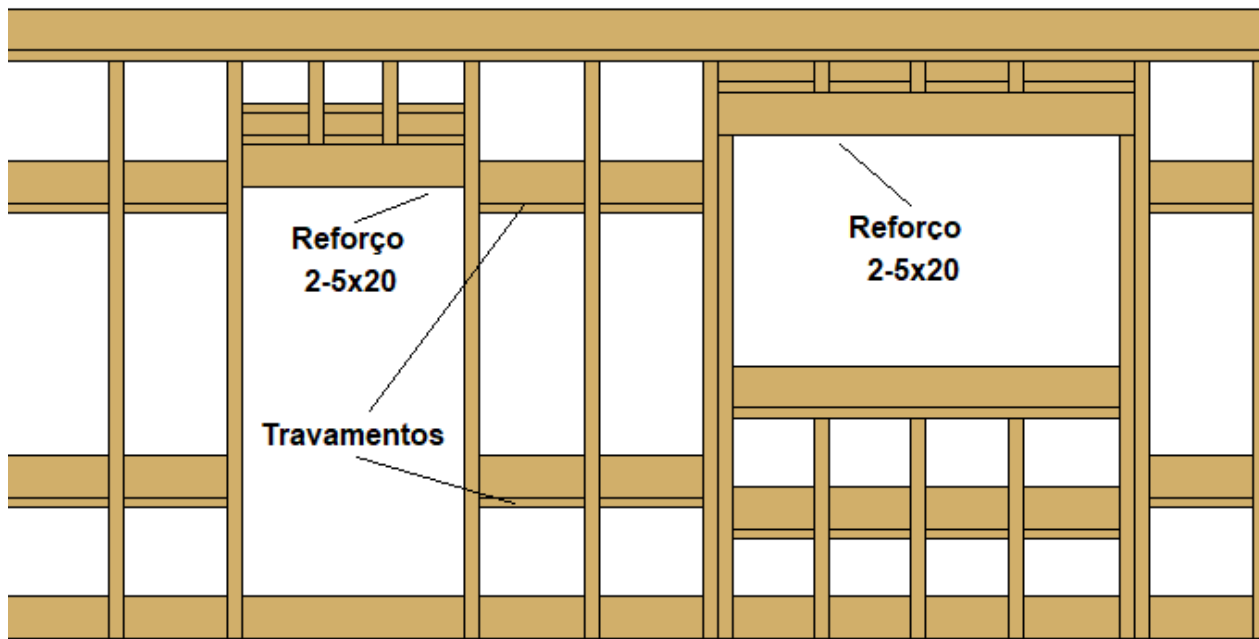
Figura 14: Estrutura das paredes.



Fonte: o autor (2020).

Para aberturas de janelas e portas, é necessária a colocação de um reforço na extremidade superior (Figura 15). Dimensionado de acordo com a tabela 3.22C2 do WFCM (2018), o reforço é constituído de duas tábuas de seção de 5x20 cm, possibilitando um vão de até 1,30 m. Para auxiliar na modelagem e análise da estrutura, preferiu-se utilizar um elemento cuja seção é a soma das duas tábuas indicadas na norma americana, resultando em um elemento de seção 10x20 cm. Para os travamentos horizontais não há uma regra em específico para dimensionamento, portanto foi optado por utilizar duas faixas ao longo da estrutura vertical.

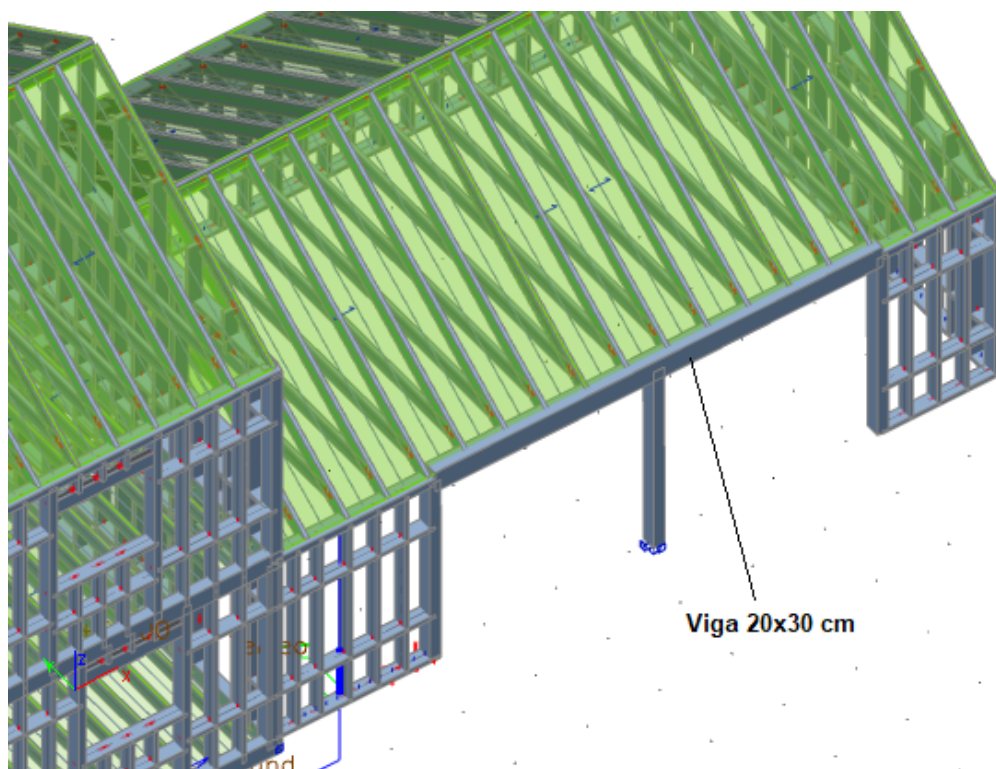
Figura 15: Reforço em vãos de aberturas.



Fonte: o autor (2020).

O vão da entrada da garagem possui 6 m de comprimento, necessitando também de uma viga com tamanho especial, caso semelhante ao do piso do primeiro pavimento, citado anteriormente. Para resistir aos esforços, a seção da viga que compõe o vão da garagem tem seção de 20x30 cm, conforme a tabela 3.22A2 do WFCM (2018). A viga é apoiada apenas em duas extremidades e no seu centro, conforme ilustrado na Figura 16. Assim como no caso anteriormente citado, o WFCM (2018) pede que a viga seja composta de quatro tábuas unidas, de seção 5x30 cm. Para simplificar a moldagem da estrutura, optou-se por um elemento único de seção 20x30 cm.

Figura 16: Viga com medida especial no vão de entrada da garagem.

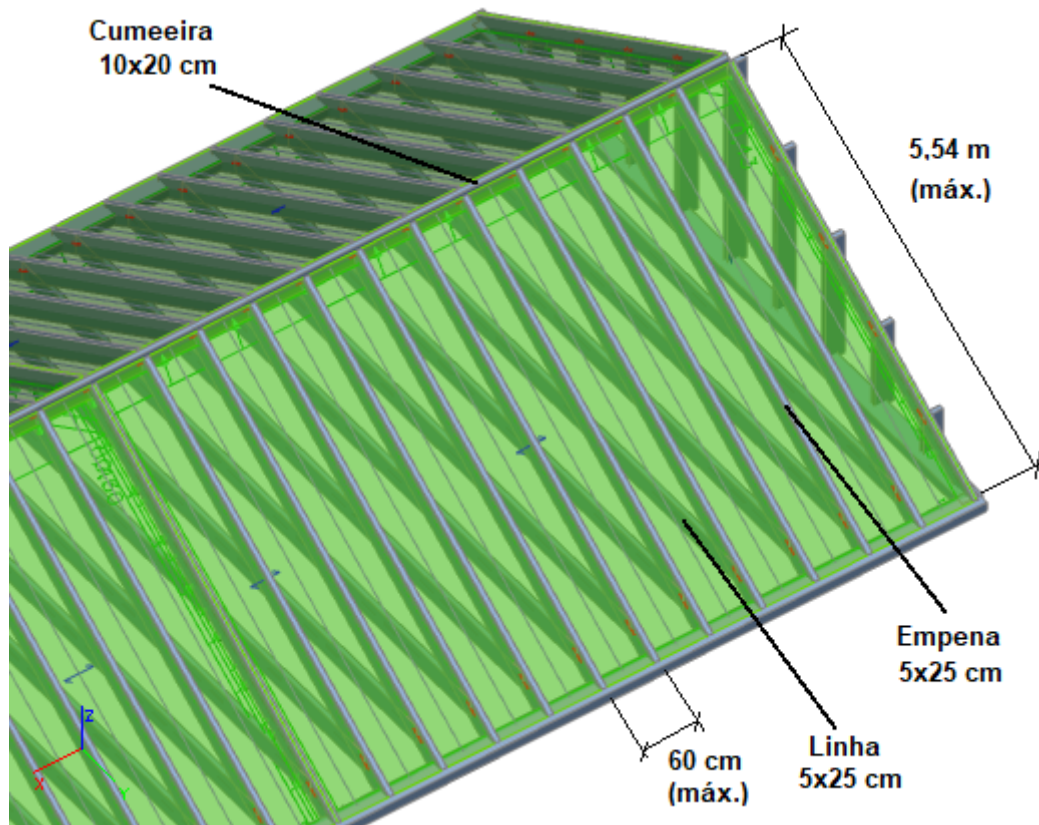


Fonte: o autor (2020).

5.2.3 Telhado

A inclinação do telhado definida no projeto arquitetônico é 8:12, com ângulo de $33,69^\circ$. A tabela 3.26M do WFCM (2018) determina o comprimento máximo entre nós das empenas do telhado, de acordo com a velocidade do vento, espaçamento entre empenas e seção e tipo da madeira a ser utilizada. A seção da madeira adotada é de 5x25 cm, com espaçamento máximo de 60 cm, o que resulta num comprimento máximo de 5,54 m (Figura 17). O espaçamento entre empenas adotado no projeto foi de 56 cm e 54 cm, para a cobertura da garagem e da residência, respectivamente. O comprimento utilizado nas empenas de ambos telhados da edificação é de 4,20 m. A viga utilizada na cumeeira tem seção de 10x20 cm, em concordância com a Tabela 3.29 do WFCM (2018). O elemento utilizado para compor a linha tem seção de 5x25 cm, cujo comprimento máximo deve ser de 7,92 metros, como indica a tabela 3.25A1 da norma americana. O comprimento adotado para o mesmo é de 6,35 m.

Figura 17: Estrutura do telhado.



Fonte: o autor (2020).

5.3 RESULTADOS DE ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

Para esta seção, apenas os elementos que sofrem as maiores solicitações serão analisados. Tendo isto em vista, automaticamente os demais elementos que comportam menores solicitações possuem um maior coeficiente de segurança, sendo assim não necessitam de análise.

Os valores dos esforços foram obtidos através do programa computacional SCIA Engineer, onde foram lançados os carregamentos anteriormente citados neste trabalho. Estes valores são provenientes da combinação de cargas que inclui:

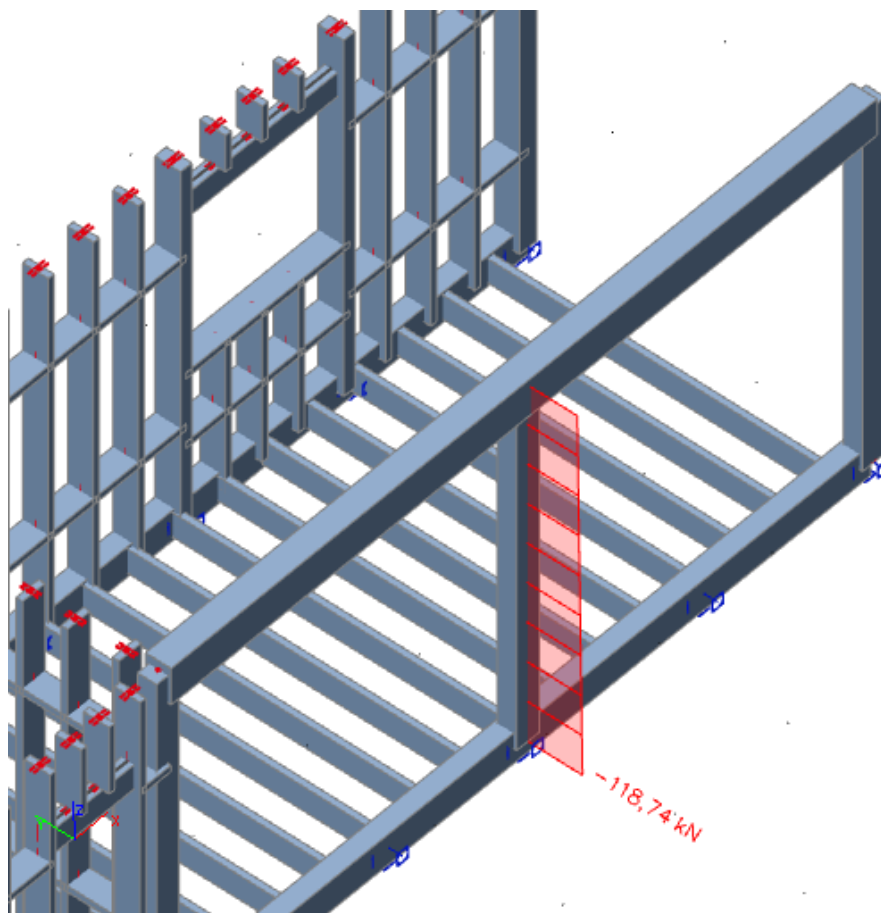
- a) Peso próprio da estrutura;
- b) cargas variáveis;
- c) peso dos componentes construtivos;
- d) cargas devido ao vento.

5.3.1 Elementos Verticais

Dentre os elementos verticais analisados temos dois tipos: os pilares principais, de seção 15x20 cm e os pilares secundários que compõem as paredes, de seção 5x20 cm. Ambos elementos analisados tem comprimento de 2,80 m. O esforço atuante nestes elementos é o de compressão.

O pilar principal (Figura 18) mais solicitado encontra-se no pavimento térreo e apoia o centro do vão livre de 6 m, suportando uma carga de 118,74 kN. De acordo com o item 7.3.2 da NBR 7190:1997, este elemento caracteriza-se como uma peça medianamente esbelta e a condição de segurança resulta em 0,52, provando que este e, conseqüentemente, todos os outros pilares principais foram dimensionados corretamente.

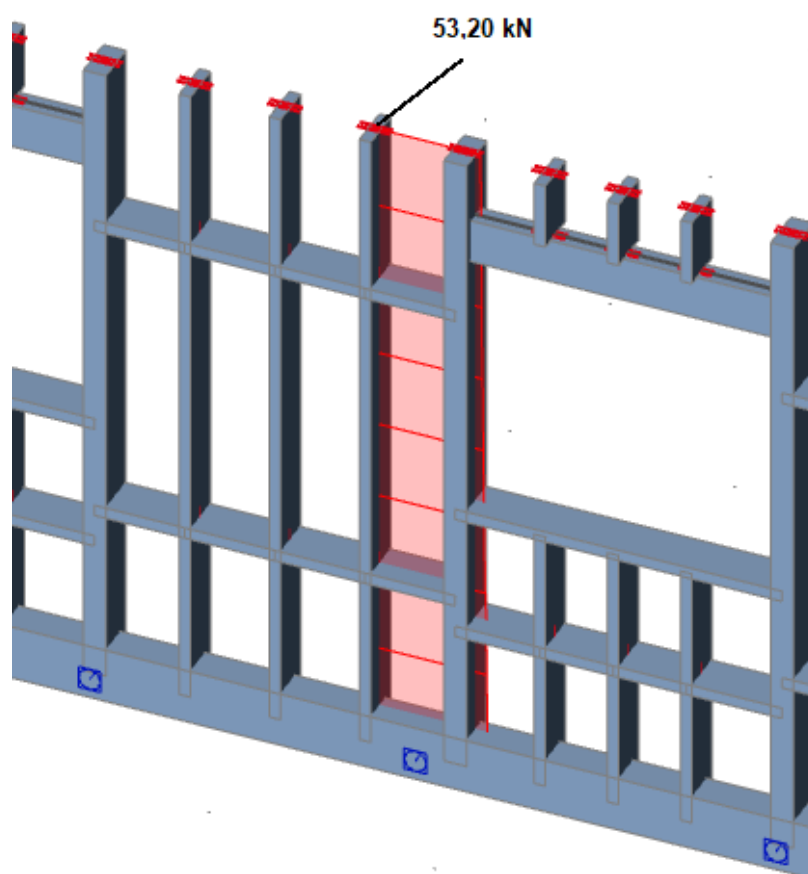
Figura 18: Solicitação do pilar principal.



Fonte: o autor (2020).

O pilar secundário com maior solicitação de carga (Figura 19) também se encontra no pavimento térreo e a carga atuante é de 53,20 kN, resultando num coeficiente de segurança de 0,70 - o que mostra que o dimensionamento é apropriado.

Figura 19: Solicitação do pilar secundário.



Fonte: o autor (2020).

5.3.2 Elementos horizontais

Cinco tipos diferentes de elementos horizontais da estrutura foram analisados: vigas principais, vigas secundárias, vigas de grandes vãos, vigas de aberturas de janelas e a viga de reforço do vão da escada. Os principais esforços atuantes nas vigas são os de flexão (tração e compressão) e cisalhamento, ambos calculados de acordo com os respectivos itens 7.3.3 e 7.4.1 da NBR 7190:1997.

Localizada no primeiro pavimento, a viga principal analisada tem o maior momento atuante de 7,23 kN.m e força cortante de 46,14 kN. Analisando os esforços solicitados e a resistência do elemento, podemos concluir que o dimensionamento

está correto apenas para os esforços de compressão e tração, conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5: Tensões atuantes e resistência da viga principal.

	Tensão máx. atuante (kN/cm²)	Resistência do elemento (kN/cm²)	Condição de segurança
Cisalhamento	0,22	0,2	SEGURO
Compressão	0,45	1,41	SEGURO
Tração	0,45	1,79	SEGURO

Fonte: o autor (2020).

Sendo assim, é necessário redimensionar a mesma, adicionando uma tábua de 5x30 cm, resultando numa seção de 20x30 cm, atendendo às especificações, conforme exibido na Tabela 5.

Tabela 6: Tensões atuantes e resistência da viga principal redimensionada.

	Tensão máx. atuante (kN/cm²)	Resistência do elemento (kN/cm²)	Condição de segurança
Cisalhamento	0,16	0,2	SEGURO
Compressão	0,34	1,41	SEGURO
Tração	0,34	1,79	SEGURO

Fonte: o autor (2020).

O vão da viga secundária analisada mede 4,20 m e seu momento atuante é de 5,17 kN.m e a força cortante que atua na mesma é de 5,01 kN. A Tabela 7 mostra o comparativo entre tensões atuantes e tensões resistentes, onde pode-se ver que o dimensionamento à flexão e cisalhamento está de acordo com a Norma Brasileira.

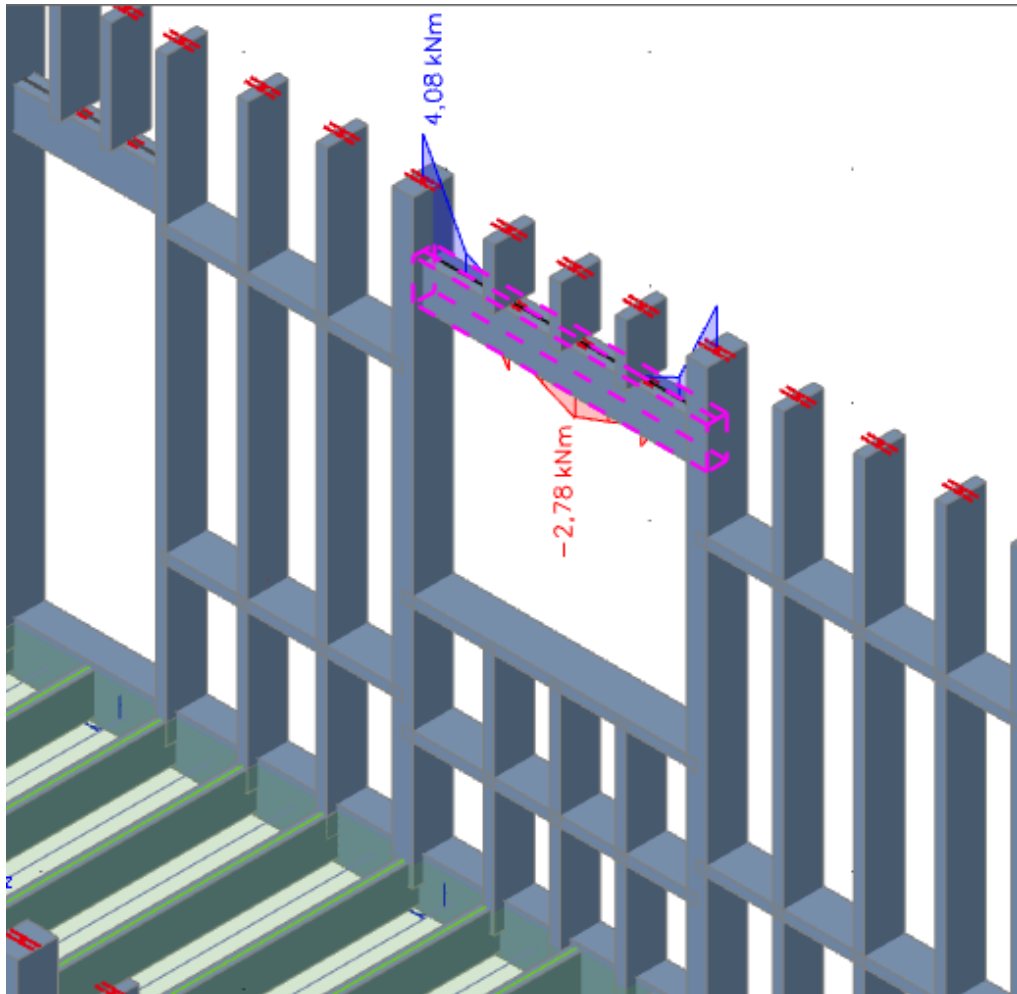
Tabela 7: Tensões atuantes e resistência da viga secundária.

	Tensão máx. atuante (kN/cm²)	Resistência do elemento (kN/cm²)	Condição de segurança
Cisalhamento	0,1	0,2	SEGURO
Compressão	1,39	1,41	SEGURO
Tração	1,39	1,79	SEGURO

Fonte: o autor (2020).

Dentre todas as vigas dos vãos das janelas, a que sofreu maior solicitação tem esforço cortante de 17,58 kN e momento fletor de 4,08 kN.m (Figura 20).

Figura 20: Momento fletor – viga vão da janela.



Fonte: o autor (2020).

Como mostra a Tabela 8, o dimensionamento está dentro do especificado na Norma Brasileira.

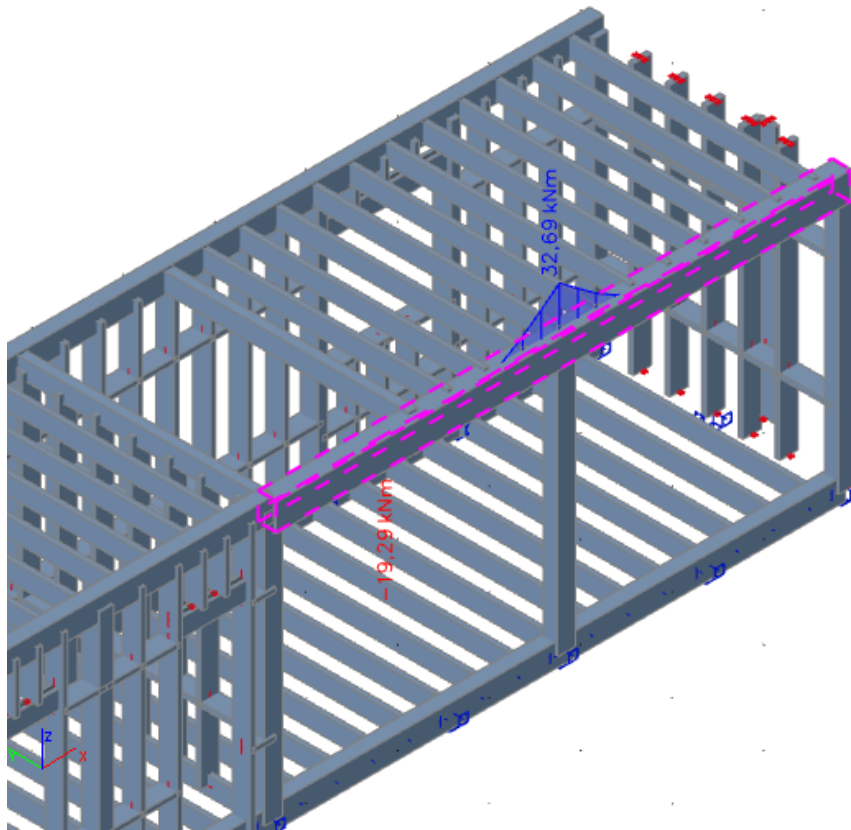
Tabela 8: Tensões atuantes e resistência da viga do vão de janelas.

	Tensão máx. atuante (kN/cm ²)	Resistência do elemento (kN/cm ²)	Condição de segurança
Cisalhamento	0,18	0,2	SEGURO
Compressão	0,55	1,41	SEGURO
Tração	0,55	1,79	SEGURO

Fonte: o autor (2020).

A edificação tem duas vigas com medidas especiais para suportar os vãos livres maiores, uma na residência e outra na garagem, ambas com seção de 20x30 cm. A mais solicitada dentre as duas é a da residência (Figura 21), com um momento fletor de 32,73 kN.m e um esforço cortante de 51,12 kN.

Figura 21: Momento fletor - viga 20x30 cm.



Fonte: o autor (2020).

Na Tabela 9 fica explícito que apesar de atender aos esforços cortantes e de tração, o elemento está sub dimensionado quanto ao esforço de compressão, fazendo-se necessário o redimensionamento da peça.

Tabela 9: Tensões atuantes e resistência da viga especial 20x30 cm.

	Tensão máx. atuante (kN/cm ²)	Resistência do elemento (kN/cm ²)	Condição de segurança
Cisalhamento	0,18	0,2	SEGURO
Compressão	1,53	1,41	INSEGURO
Tração	1,53	1,79	SEGURO

Fonte: o autor (2020).

Sendo assim, se faz necessário o redimensionamento da seção da mesma para 20x35 cm. O aumento de 5 cm da altura resulta em uma viga segura ao esforço de compressão, como mostrado na Tabela 10:

Tabela 10: Tensões atuantes e resistência da viga especial redimensionada.

	Tensão máx. atuante (kN/cm²)	Resistência do elemento (kN/cm²)	Condição de segurança
Cisalhamento	0,15	0,2	SEGURO
Compressão	0,12	1,41	INSEGURO
Tração	0,12	1,79	SEGURO

Fonte: o autor (2020).

5.3.3 Elementos do telhado

Para a estrutura do telhado serão analisadas a cumeeira, as linhas e as empenas. Os esforços atuantes nas mesmas são os de cisalhamento e flexão (tração e compressão).

O maior momento fletor que age na cumeeira tem valor de 3,06 kN.m e o esforço cortante é de 5,68 kN. Segundo a NBR 7190:1997, o dimensionamento do elemento está de acordo com os esforços solicitados (Tabela 11).

Tabela 11: Tensões atuantes e resistência da cumeeira.

	Tensão máx. atuante (kN/cm²)	Resistência do elemento (kN/cm²)	Condição de segurança
Cisalhamento	0,11	0,2	SEGURO
Compressão	1,29	1,41	SEGURO
Tração	1,29	1,79	SEGURO

Fonte: o autor (2020).

A linha que sofreu maior elemento é a localizada a parte central da estrutura, onde o momento fletor é de 4,12 kN.m e o esforço cortante de 3,81 kN. De acordo com os cálculos de resistência à flexão e cisalhamento da NBR 7190:1997, o dimensionamento atende aos esforços solicitados, conforme mostra a Tabela 12:

Tabela 12: Tensões atuantes e resistência da linha.

	Tensão máx. atuante (kN/cm²)	Resistência do elemento (kN/cm²)	Condição de segurança
Cisalhamento	0,06	0,2	SEGURO
Compressão	1,11	1,41	SEGURO
Tração	1,11	1,79	SEGURO

Fonte: o autor (2020).

Dentre os elementos das empenas, o mais solicitado tem momento fletor de 4,41 kN.m e esforço cortante de 8,06 kN. O dimensionamento dos elementos está de acordo com o solicitado, conforme mostrado na Tabela 13.

Tabela 13: Tensões atuantes e resistência da empena.

	Tensão máx. atuante (kN/cm²)	Resistência do elemento (kN/cm²)	Condição de segurança
Cisalhamento	0,13	0,2	SEGURO
Compressão	1,19	1,41	SEGURO
Tração	1,19	1,79	SEGURO

Fonte: o autor (2020).

A viga de reforço utilizada no vão da escada também ficou dentro dos parâmetros exigidos na Norma Brasileira, conforme mostra a Tabela 14.

Tabela 14: Tensões atuantes e resistência da viga de reforço do vão da escada.

VIGA REFORÇO VÃO DA ESCADA			
	Tensão máx. atuante (kN/cm²)	Resistência do elemento (kN/cm²)	Condição de segurança
Cisalhamento	0,09	0,2	SEGURO
Compressão	0,64	1,41	SEGURO
Tração	0,64	1,79	SEGURO

Fonte: o autor (2020).

5.3.4 Deformações limites da estrutura

A verificação quanto ao estado limite de serviço da estrutura foi feita de acordo com a NBR 7190:1997, conforme explanado anteriormente. O resultado da verificação

segurança dos elementos horizontais da estrutura quanto às deformações limites se encontra na Tabela 15, onde apenas o elemento com maior flecha de cada tipo foi analisado.

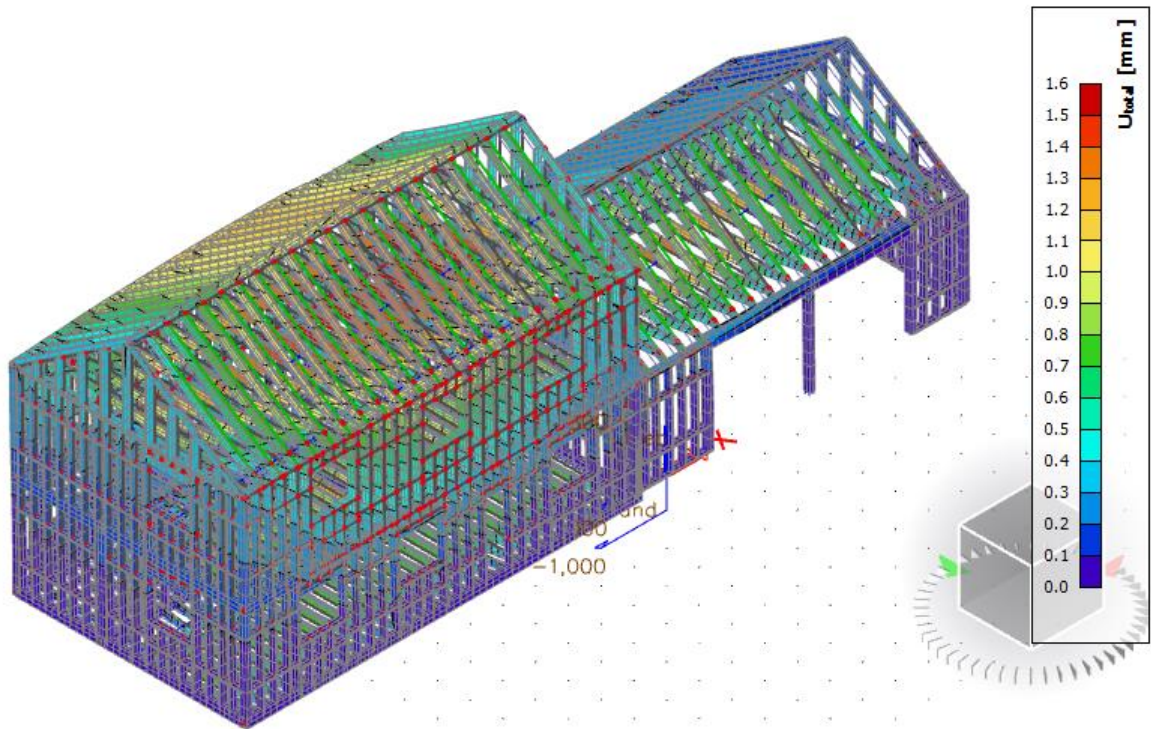
Tabela 15: Verificação de segurança de estados limites dos elementos horizontais.

ESTADO LIMITE DE SERVIÇO			
Tipo de viga	Flecha (mm)	L/200 (mm)	Condição de segurança
Residência - 20x35	0,2	31	SEGURO
Garagem - 20x30	0,3	31	SEGURO
Principal	0,4	2	SEGURO
Secundária	0,8	21	SEGURO
Vão de janela	0,3	6,5	SEGURO
Vão da escada	0,5	13,5	SEGURO
Cumeeira	1,1	2	SEGURO
Linha	1,6	31,75	SEGURO
Empena	1,3	20,75	SEGURO

Fonte: o autor (2020).

Na Figura 22 podemos ver a deformada da edificação inteira. É notável que os maiores deslocamentos ocorrem nas estruturas do telhado e pavimentos.

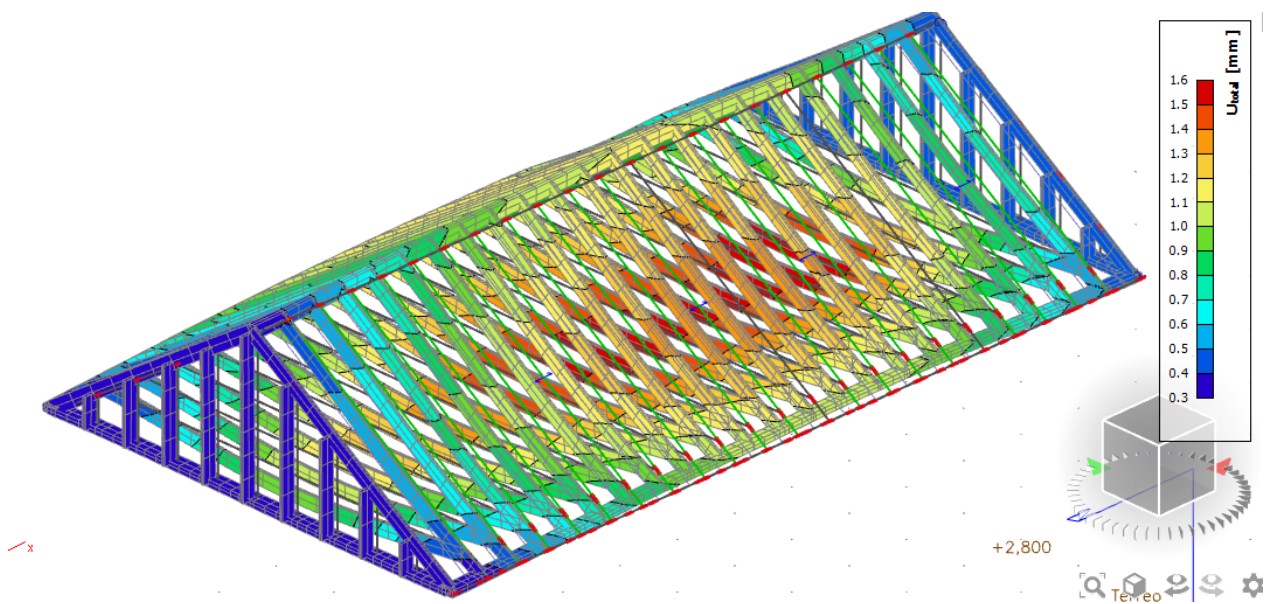
Figura 22: Deformada da estrutura.



Fonte: o autor (2020).

Analisando a Tabela 16 e a Figura 23 pode-se concluir que a flecha do elemento da cumeeira ficou bem próxima do limite permitido, porém ainda dentro do parâmetro estipulado pela Norma Brasileira.

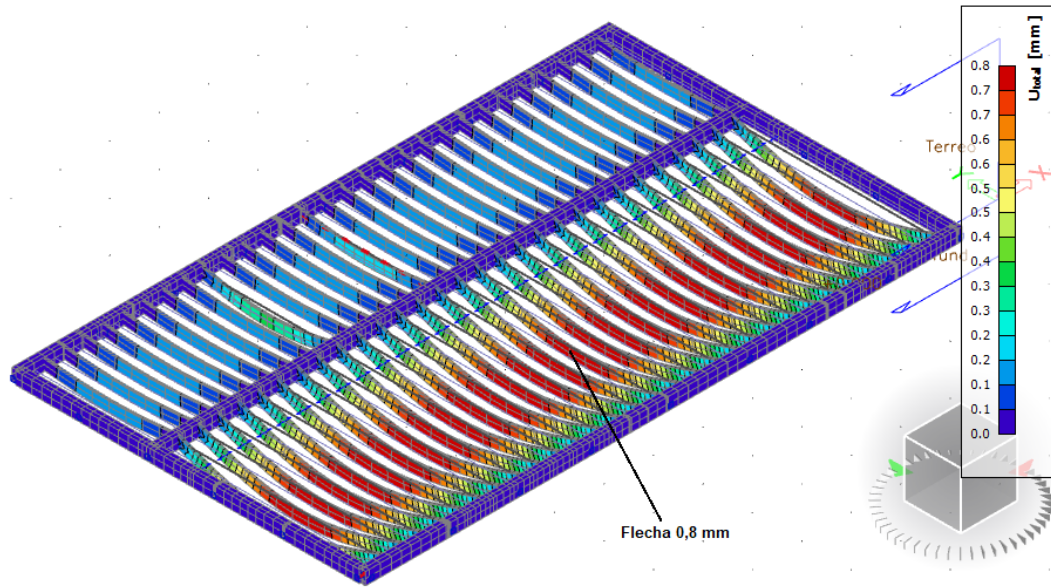
Figura 23: Deformada da estrutura do telhado



Fonte: o autor (2020).

Na figura 24 está ilustrada a deformada do pavimento térreo, cuja flecha dos elementos está de acordo com a NBR 7190:1997.

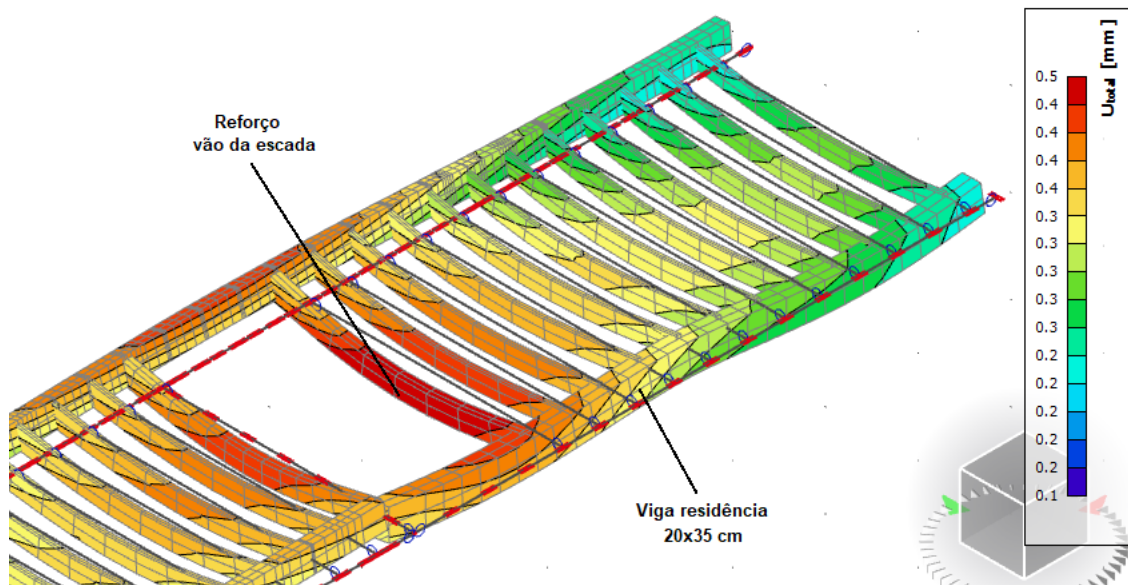
Figura 24: Deformada da estrutura do pavimento térreo.



Fonte: o autor (2020).

As vigas de medida especial, localizadas na garagem e na residência, assim como a viga de reforço do vão da escada (Figura 25), estão adequadas conforme pede a Norma brasileira.

Figura 25: Flechas das vigas de seção especial da residência.



Fonte: o autor (2020).

6 CONCLUSÕES

Analisando os resultados do presente trabalho, foi possível concluir que há uma grande limitação na análise e dimensionamento do contraventamento, o mesmo possui referências normativas internacionais, porém não possui referências normativas na Norma Brasileira para a verificação dos esforços. O fato da norma NBR 7190 (ABNT, 1997) não ter especificações e parâmetros para o dimensionamento do contraventamento da estrutura por meio de chapas de compensado ou OSB (ou por qualquer outro meio), impede de conferir a resistência da estrutura neste quesito. Sendo assim, as únicas forças laterais consideradas que atuam na estrutura foram aplicadas na estrutura do telhado. Tendo em vista que as chapas de contraventamento têm grande relevância na resistência do conjunto estrutural, esperava-se que a estrutura dos elementos carentes de contraventamento (paredes e telhado) tendessem a ficar sobrecarregados, resultando num sub dimensionamento geral da estrutura. Porém, mesmo assim, os elementos analisados encontram-se de acordo com os parâmetros estipulados pela NBR7190:1997. Todos os pilares, secundários e principais atenderam à carga solicitada em todos os aspectos. Quanto aos elementos horizontais, vigas secundárias, vigas de reforço e elementos da estrutura do telhado, todos foram dimensionados corretamente. Apesar da maioria dos elementos da estrutura estarem dimensionados conforme a norma NBR 7190 (ABNT, 1997), foram encontradas limitações na verificação das seções de vigas de grandes vãos e das vigas principais da estrutura dos pavimentos, ainda embora tenham resistências próximas do desejado.

Com base nos resultados de dimensionamento e nas verificações conforme especificado na NBR7190:1997, conclui-se que é possível utilizar o *Wood Frame Construction Manual (2018)* para dimensionar estruturas em *wood frame* utilizando parâmetros de matéria prima disponível no Brasil, assim como também pode-se utilizar as especificações de ações e carregamentos, conforme a NBR 6123:1988 de forças devido ao vento em edificações e conforme a NBR 6120:2019 de ações para o cálculo de estruturas e edificações especificam. Porém, deve-se atentar ao dimensionamento de vigas com vãos maiores e vigas principais de estruturas das estruturas dos pavimentos, que, conforme o tamanho do vão e a carga exercida sobre o elemento, podem sofrer sub dimensionamento. Também é possível concluir que a

maior limitação da utilização da NBR 7190:1997 para análise e conferência de elementos é o fato de a própria norma ter limitações na análise de contraventamento, dificultando a análise do mesmo.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN WOOD COUNCIL. **Wood Frame Construction Manual**. 2018.
- ANDERSON, L. O. **Wood Frame House Construction**. 1975. U.S. Department of Agriculture. Washington, DC.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Avança a elaboração da Norma sobre Wood Frame**. 2016. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/imprensa/releases/5319-avanca-a-elaboracao-da-norma-sobre-wood-frame>>. Acesso em: 13/10/2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Comissão de Estudos de Wood Frame retoma atividades**. 2017. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/noticias/5789-comissao-de-estudos-de-wood-frame-retoma-atividades>>. Acesso em: 19/10/2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7190 (1997). Projeto de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro.
- ARAÚJO, V. de et al. Woodframe: light framing houses for developing countries. **Revista de la Construcción**, v. 15, n. 2, p. 78-87, 2016.
- LEITE, J. C. P. S.; LAHR, F. A. R. **Diretrizes Básicas Para Projeto em Wood Frame**. Revista Construindo, v. 7, n. 2, jul./dez. 2015.
- LP Building Products. **Construção seca e sustentável com Steel frame e Wood frame**. Curitiba-PR, 2011. Disponível em: <<http://www.lpbrasil.com.br/aplicacoes/aplicacoes-na-contrucao-ces.asp>>. Acesso em: 15/10/2019
- NHBC Standards. **Timber and concrete upper floors**. 2010. Disponível em: http://nhbccampaigns.co.uk/landingpages/techzone/previous_versions/2010/Part6/section4/sitework.htm>. Acesso em 19/10/2019.
- NASCIMENTO, O. L. **Alvenarias**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBS; CBCA, 2004. (Série Manual de Construção em Aço).
- PRONTA entrega. **Revista Técnica**, São Paulo, ano 17, ed. 151, p. 48-49, out. 2009.
- THALLON, R. **Graphic Guide to Frame Construction**. Newtown: Taunton, 2008.

