

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS OTTON PEREIRA

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO EM LIGHT STEEL FRAMING
CONSIDERANDO PAINÉIS DE CISALHAMENTO VIA MODELO DE DUPLAS
DIAGONAIS EQUIVALENTES**

CAMPO MOURÃO

2021

MATHEUS OTTON PEREIRA

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO EM LIGHT STEEL FRAMING
CONSIDERANDO PAINÉIS DE CISALHAMENTO VIA MODELO DE DUPLAS
DIAGONAIS EQUIVALENTES**

**Structural analysis of a building in light steel framing considering shear walls
via equivalent double diagonal model**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Ronaldo Rigobello.

CAMPO MORÃO

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MATHEUS OTTON PEREIRA

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO EM LIGHT STEEL FRAMING
CONSIDERANDO PAINÉIS DE CISALHAMENTO VIA MODELO DE DUPLAS
DIAGONAIS EQUIVALENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 24/novembro/2021

Jorge Luís Nunes de Góes
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcelo Rodrigo Carreira
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ronaldo Rigobello
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAMPO MOURÃO

2021

RESUMO

Na atualidade, sistemas como o *Light Steel Framing* vem ganhando espaço e consolidando-se no mercado, pois possibilitam uma construção com o mínimo de desperdício, rápida execução e melhor eficiência de processos. Assim, torna-se fundamental o estudo a respeito dos diferentes componentes estruturais que constituem tal sistema. As placas de fechamento utilizadas neste sistema agregam aos painéis maior capacidade de resistir à esforços horizontais, devido à sua considerável rigidez. No entanto, a maior parte dos códigos técnicos ainda não abordam diretrizes práticas para a sua consideração nos projetos estruturais. Deste modo, o presente trabalho propõe-se a abordar o tema por meio da realização de uma análise de uma estrutura em *Light Steel Framing*, composta por sete pavimentos, com o objetivo de avaliar seu deslocamento lateral com à consideração dos painéis de *Oriented Strand Board* na modelagem da estrutura via modelo de duplas diagonais equivalentes e comparar com a abordagem tradicional, de utilização de diagonais simples. Ao finalizar esse estudo, conclui-se que o modelo de duplas diagonais equivalentes utilizado é capaz de representar de maneira adequada a rigidez dos painéis da estrutura, apresentando-se como uma alternativa interessante para fins práticos de análise e projeto.

Palavras-chave: *light steel framing*; painéis de cisalhamento; modelagem simplificada; placas de fechamento.

ABSTRACT

Currently, systems such as Light Steel Framing have been gaining ground and consolidating in the market, as they enable construction with minimal waste, quick execution and better process efficiency. Thus, it is essential to study the different structural components that make up such a system. The sheathing used in this system add to the panels a greater capacity to resist horizontal efforts, due to their considerable rigidity. However, most technical codes still do not address practical guidelines for their consideration in structural designs. Thus, the present work proposes to approach the theme by performing an analysis of a structure in Light Steel Framing, composed of seven floors, with the objective of evaluating its lateral displacement considering the Oriented Strand Board panels in the modeling of the structure via the equivalent double diagonal model and compare it with the traditional approach, using simple diagonals. At the end of this study, it is concluded that the double diagonal model used is capable of adequately representing the rigidity of the structure's panels, presenting itself as an interesting alternative for practical analysis and design purposes.

Keywords: light steel framing; shear walls; simplified modeling; sheathing.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Perfis utilizados no LSF e suas respectivas aplicações.	19
Quadro 2 - Perfis utilizados como montantes do 1° pavimento.....	45
Quadro 3 - Perfis utilizados como montantes do 2° pavimento.....	45
Quadro 4 - Perfis utilizados como montantes do 3° pavimento.....	46
Quadro 5 - Perfis utilizados como montantes do 4° pavimento.....	46
Quadro 6 - Perfis utilizados como montantes do 5° pavimento.....	46
Quadro 7 - Perfis utilizados como montantes do 6° pavimento.....	47
Quadro 8 - Perfis utilizados como vigas.....	47
Quadro 9 - Modelos de dupla diagonais equivalentes.....	49
Quadro 10 – Configurações para posicionamento dos montantes.....	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema estrutural de uma residência em LSF.	17
Figura 2 - Edificação com fechamento externo em placas de OSB.	21
Figura 3 - Tipos de placa de gesso acartonado.	22
Figura 4 - Operação de fixação de um parafuso utilizado no sistema LSF.	23
Figura 5 - Tipos de pontas de parafusos utilizados no LSF.	23
Figura 6 - Tipos de cabeças de parafusos autobrocantes.	24
Figura 7 - Painel com contraventamento em “X”.	25
Figura 8 - Efeitos da carga de vento na estrutura: a) translação e b) tombamento. ...	26
Figura 9 - Conector de ancoragem com barra roscada “hold-down”.	27
Figura 10 - Modelo simplificado para painéis de cisalhamento.	28
Figura 11 - Modelo EPP considerado para painéis de cisalhamento.	28
Figura 12 - Modelo Elasto-Plástico de Energia Equivalente (EEEP).	29
Figura 13 - Aproximação para pequenos deslocamentos.	32
Figura 14 - Esforços normais no painel simplificado.	33
Figura 15 - Planta Baixa do pavimento tipo do modelo.	34
Figura 16 - Configuração de piso seco utilizada no projeto.	35
Figura 17 - Tipos de painéis diafragmas de OSB.	36
Figura 18 - Dimensões em planta do prédio (m).	39
Figura 19 - Coeficientes finais para o cálculo da pressão de vento frontal.	41
Figura 20 - Coeficientes finais para o cálculo da pressão de vento lateral.	41
Figura 21 - Painel de OSB discretizado.	44
Figura 22 - Deslocamentos (x10 ⁻² mm) para o painel de 3300mm x 2800mm.	44
Figura 23 - Configuração dos perfis das vigas.	48
Figura 24 - Modelo unifilar do 1º pavimento edifício.	50
Figura 25 - Lançamento das vigas.	51
Figura 26 - Esquema estrutural para vigamento contínuo.	52
Figura 27 - Elementos 2D.	52
Figura 28 - Posicionamento das diagonais equivalentes a) Eixo 1, (b) Fila B.	53
Figura 29 - Modelo unifilar do edifício.	54
Figura 30 – Deslocamento U _x (mm) da estrutura.	55
Figura 31 – Deslocamento U _y (mm) da estrutura.	55
Figura 32 – Deslocamento U _z (mm) da estrutura.	56

Figura 33 - Gráfico que relaciona os deslocamentos horizontais máximos na direção do eixo X.	57
Figura 34 - Gráfico que relaciona os deslocamentos horizontais máximos na direção do eixo Y.	58
Figura 35 - Gráfico que relaciona os deslocamentos verticais máximos.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Revestimento mínimo dos perfis estruturais.	18
Tabela 2 - Características geométricas dos parafusos usados no sistema LSF.	24
Tabela 3 - Resistência nominal ao cisalhamento para carregamentos de vento e outros atuantes no plano de painéis de cisalhamento.....	30
Tabela 4 - Coeficientes para fator S2.....	40
Tabela 5 - Pressão final devida ao carregamento de vento nas paredes.....	40
Tabela 6 - Resistências à compressão dos perfis utilizados como montantes.....	43
Tabela 7 - Resistências dos perfis utilizados para as vigas.	43
Tabela 8 - Deslocamentos máximos por pavimento.....	48
Tabela 9 - Modelos de dupla diagonais equivalentes.....	49
Tabela 10 - Deslocamentos máximos por pavimento.....	56

LISTA DE SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EPP	Elástico Perfeitamente Plástico (comportamento)
EEEP	<i>Equivalent Energy Elastic Plastic</i>
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
LSF	<i>Light Steel Framing</i>
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
PFF	Perfil Formado a Frio
ZAR	Zincagem de Alta Resistência

LISTA DE SIMBOLOS

U	Perfil tipo U simples
U _e	Perfil tipo U enrijecido
Cr	Perfil tipo cartola
L	Perfil tipo cantoneira
δ_f	Deslocamento lateral do painel
$\delta(V_n)$	Deslocamento lateral do painel correspondente à força aplicada V_n
V_n	Limite de resistência do painel simplificado
θ	Ângulo entre as diagonais equivalentes e a horizontal
V	Força de cisalhamento aplicada ao painel
r_n	Resistência nominal unitária ao cisalhamento
R_n	Resistência lateral do painel
Ac	Área bruta da seção transversal do montante de bordo
s	Espaçamento entre parafusos
t _p	Espessura nominal da placa de fechamento
t _s	Espessura dos perfis
v	Cisalhamento unitário
δ_v	Deslocamento vertical da ancoragem
β	Coefficiente de dilatação térmica
ρ	Massa específica
t _n	Espessura nominal de chapa de aço
E	Módulo de elasticidade
A	Área da seção transversal da diagonal
ε	Deformação axial
σ	Tensão atuante
F	Esforço normal atuante nas diagonais equivalentes
E _s	Módulo de elasticidade do aço
f _y	Resistência ao escoamento do aço
f _u	Resistência à ruptura do aço na tração
E _x	Módulo de elasticidade longitudinal do OSB
E _z	Módulo de elasticidade transversal do OSB
E _y	Módulo de elasticidade Vertical do OSB

G_{xy}	Módulo de elasticidade ao cisalhamento transversal do OSB
G_{xx}	Módulo de cisalhamento longitudinal do OSB
G_{yz}	Módulo de cisalhamento longitudinal do OSB
V_x	Coefficiente de Poisson longitudinal
V_z	Coefficiente de Poisson vertical
V_y	Coefficiente de Poisson transversal
U_x	Deslocamento no eixo x
U_y	Deslocamento no eixo y
U_z	Deslocamento no eixo z

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo Geral	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	JUSTIFICATIVA.....	16
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
4.1	Sistema Light Steel Framing	17
4.1.1	Perfis Formados a Frio	18
4.1.2	Placas de Fechamento.....	20
4.1.3	Ligações	23
4.2	Estabilidade Global da Estrutura	24
4.3	Modelos Simplificados Para Painéis de Cisalhamento.....	27
5	ESTUDO DE CASO	34
5.1	Introdução	34
5.2	Características estruturais do modelo	35
5.2.1	Pisos.....	35
5.2.2	Painéis de parede.....	36
5.3	Ações e combinações de ações.....	37
5.3.1	Ações de pisos	37
5.3.2	Ações permanentes nos painéis de paredes.....	38
5.3.3	Pressão dinâmica do vento	39
5.3.4	Combinações de ações	41
5.4	Considerações para os Materiais.....	42
5.4.1	Perfis Metálicos	42
5.4.2	Placas de OSB	43
5.5	Elementos estruturais adotados na edificação	45
5.5.1	Montantes.....	45
5.5.2	Vigas	47
5.6	Resultados	48
6	METODOLOGIA	49
6.1	Diagonais equivalentes.....	49
6.2	Modelagem da estrutura	50

6.2.1	Montantes.....	50
6.2.2	Vigas	51
6.2.3	Pisos.....	52
6.2.4	Contraventamento	53
7	ANÁLISE DE RESULTADOS	54
8	CONCLUSÕES	60
	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil no Brasil ainda é caracterizada pela utilização de sistemas construtivos predominantemente artesanais no caso de construções residenciais, tendo como característica a baixa produtividade e principalmente o grande desperdício de materiais. No entanto, a busca constante por maior produtividade e por melhor qualidade imposta pela concorrência de mercado vêm mudando a visão da indústria de obras civis no país. Assim, sistemas como o *Light Steel Framing* vem ganhando espaço e consolidando-se no mercado, pois possibilitam uma construção com o mínimo de desperdício, com grande rapidez de execução e melhor eficiência de processos.

Tendo em vista a transição do sistema artesanal para o industrializado, é necessário qualificar a mão de obra e refinar os métodos de cálculo, levando em consideração a segurança e o desempenho, fazendo com que o sistema LSF seja financeiramente viável quando comparado a métodos tradicionais. Assim, torna-se fundamental o estudo a respeito dos diferentes componentes estruturais que constituem o sistema.

Atualmente, não existe no Brasil uma norma específica para construções com light steel framing que contemplem uma estratégia para consideração da contribuição dos painéis de cisalhamento na estabilidade lateral das edificações em LSF. Isso gera desperdício de materiais, uma vez que segundo estudos como Tian, Wang e Lu (2004) as placas de OSB que compõem os painéis de cisalhamento são responsáveis por 96% da resistência total do painel.

A aplicação do modelo de duplas diagonais, apresentado em Pedrosa (2015) é uma alternativa interessante, pois permite a utilização do esquema independente da direção da ação horizontal, o que traz vantagens em relação ao modelo de diagonais simples.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é aplicar uma estratégia de análise estrutural de um edifício em LSF, considerando os painéis de cisalhamento na modelagem estrutural através do modelo de duplas diagonais equivalentes.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Determinar os parâmetros para consideração dos painéis de cisalhamento via modelo de duplas diagonais equivalentes de edifício em LSF proposto por Bevilaqua (2005).
- Modelar o edifício utilizando elementos unifilares de barra.
- Determinar o deslocamento lateral da estrutura em cada pavimento de acordo com a estratégia de duplas diagonais equivalentes.
- Comparar a estratégia de análise proposta em relação aos modelos de diagonais equivalentes existentes.

3 JUSTIFICATIVA

Apesar dos estudos recentes sobre o tema, não há norma nacional que contemple estratégias para consideração da contribuição dos painéis de cisalhamento na estabilidade lateral das edificações em LSF.

Assim, os procedimentos convencionais de cálculo para esta situação são conservadores, pois não levam em consideração a contribuição de todos os elementos que compõem os painéis na análise estrutural. Tal consideração pode resultar em vantagens econômicas, como a otimização e melhor aproveitamento dos materiais.

A utilização de um modelo simplificado fornece uma alternativa prática e eficiente para caracterizar a contribuição das placas de fechamento na modelagem de uma edificação, uma vez que modelos complexos se tornam pouco viáveis devido aos recursos computacionais necessários e ao tempo disponível dos projetistas.

Além disso, o modelo de duplas diagonais tem a vantagem de trabalhar tanto à compressão quanto à tração, enquanto que no modelo de diagonais simples há que se dispor a diagonal de modo que essa seja tracionada apenas. Portanto, o modelo de duplas diagonais pode ser aplicado em casos de solicitações cíclicas, como na análise de sismos, por exemplo, além de casos em que a assimetria da estrutura possa gerar ações de compressão nas diagonais.

Visando a aplicação prática, esse trabalho faz uma pesquisa em publicações recentes a fim de aplicar uma metodologia simplificada que considere a rigidez atribuída pelos painéis na análise da estrutura, por meio modelagem de um edifício utilizando elementos unifilares de barra. Toda essa estratégia é exemplificada em um estudo de caso de um edifício em LSF apresentado originalmente em Bevilaqua (2005).

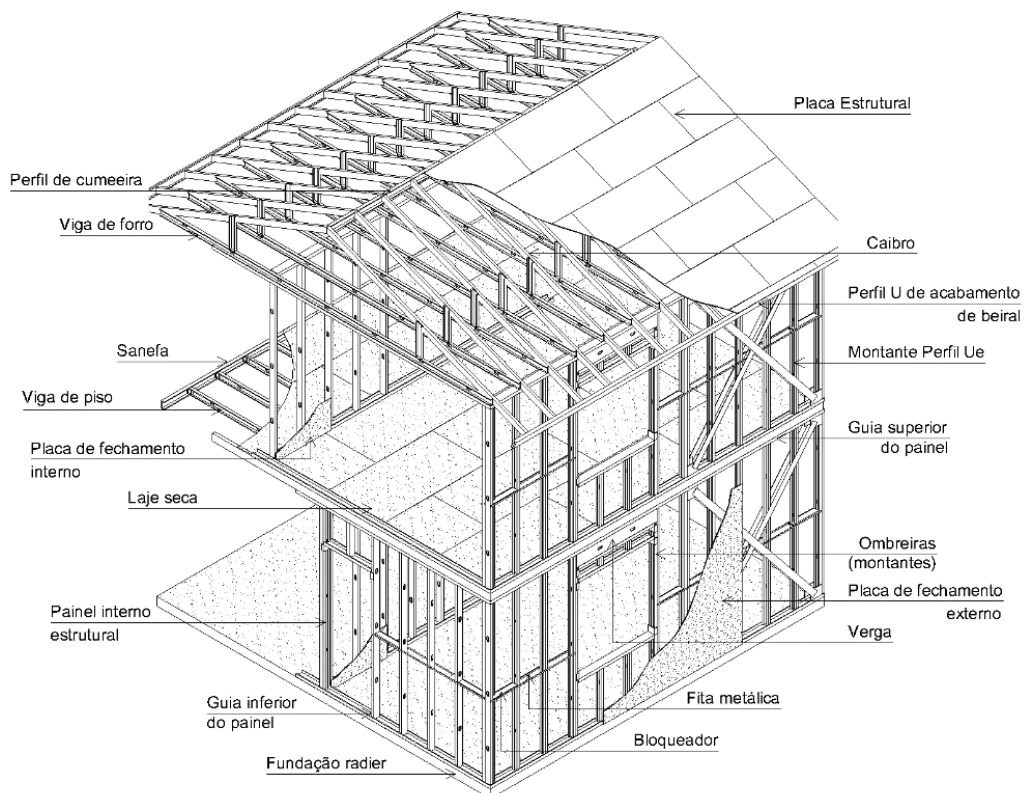
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Sistema *Light Steel Framing*

De acordo com Santiago, Freitas e Crasto (2012) o LSF é um sistema construtivo de concepção racional, que tem como principal característica uma estrutura constituída por perfis formados a frio (PFF) de aço galvanizado. Por ser um sistema industrializado, possibilita uma construção com o mínimo de desperdício e com grande rapidez de execução.

Segundo os autores, o sistema LSF é composto por diversos elementos individuais ligados entre si, quando agrupados formam subsistemas que funcionam em conjunto para resistir aos esforços que solicitam a edificação. Tais elementos são empregados para a composição de painéis estruturais, vigas de piso, tesouras de cobertura, sistemas de contraventamentos e demais componentes. Na Figura 1 é possível visualizar esquematicamente, a estrutura e os subsistemas de uma casa em LSF.

Figura 1 – Esquema estrutural de uma residência em LSF.



Fonte: Santiago, Freitas e Crasto (2012, p. 14).

4.1.1 Perfis Formados a Frio

O sistema LSF utiliza em sua estrutura os perfis formados a frio, os quais são obtidos a partir do dobramento de tiras cortadas de chapas ou bobinas, ou por conformação contínua a partir de matrizes rotativas, sendo ambas as operações realizadas com o aço em temperatura ambiente (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012).

Segundo Prudêncio (2017) o aço utilizado para a conformação desses perfis é o aço zincado de alta resistência (ZAR), o qual passa pelo processo de galvanização onde as chapas de aço são revestidas com zinco ou liga alumínio-zinco. Tal processo confere aos perfis uma elevada durabilidade, protegendo-os contra as ações de corrosão. De acordo com a ABNT NBR 15253:2014 uma quantidade mínima de revestimento deve ser aplicada, conforme apresentado na Tabela 1

Tabela 1 - Revestimento mínimo dos perfis estruturais.

Tipo de revestimento	Perfis estruturais	
	Massa mínima do revestimento ^(a) g/m ²	Denominação de revestimento conforme as seguintes normas
Zincado por imersão a quente	275 (ABNT NBR 7008-1)	Z275 (ABNT NBR 7008-1)
Alumínio-zinco por imersão a quente	150 (ABNT NBR 15578)	AZ150 (ABNT NBR 15578)

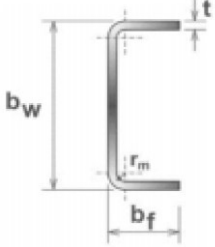
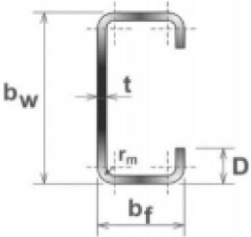
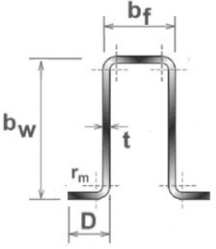
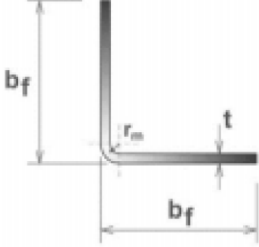
^(a) A massa mínima refere-se ao total nas duas faces (média do ensaio triplo).

Fonte: ABNT NBR 15253 (2014, p. 9).

De acordo com Santiago, Freitas e Crasto (2012) nas construções em LSF são utilizados essencialmente 4 seções de perfis, os quais são designados por perfis tipo U (U simples), Ue (U enrijecido) cartola e L (cantoneira), sendo cada perfil utilizado para uma função específica. Segundo os autores, os perfis U são utilizados como guia na base e no topo dos painéis, onde as guias não têm a função de transmitir ou absorver esforços. Suas dimensões de seção são ligeiramente superiores às do perfil Ue já que estes últimos devem encaixar nas guias para serem fixados. Os perfis Ue são utilizados para montantes, os quais são dispostos na vertical e equidistantes, 400mm ou 600mm, de acordo com o cálculo estrutural. Por fim, o perfil L é normalmente utilizado em conexões de elementos e o cartola é comumente

empregado como ripas de telhado. O Quadro 1 apresenta as principais seções transversais de PFF utilizadas no sistema LSF e suas aplicações.

Quadro 1 - Perfis utilizados no LSF e suas respectivas aplicações.

Seção Transversal	Denominação ABNT NBR 6.355	Utilização
	<p>U simples $U\ b_w \times b_f \times t_n$</p>	<p>Guia Ripa Bloqueador Sanefa</p>
	<p>U enrijecido $U_e\ b_w \times b_f \times D \times t_n$</p>	<p>Bloqueador Enrijecedor de alma Montante Verga Viga</p>
	<p>Cartola $Cr\ b_w \times b_f \times D \times t_n$</p>	<p>Ripa</p>
	<p>Cantoneira de abas iguais $L\ b_f \times b_f \times t_n$</p>	<p>Borda para fôrma Ligações</p>

Fonte: Prudêncio (2017, p. 26).

4.1.2 Placas de Fechamento

De acordo com Santiago, Freitas e Crasto (2012) o sistema LSF tem em sua essência o emprego de vedações racionalizadas afim de promover um maior grau de industrialização a obra, nesse aspecto opta-se por utilizar fechamentos que propiciem uma obra seca e constituída por elementos leves, estes elementos possuem dimensões padronizadas podendo apresentar diferentes espessuras. No mercado nacional os materiais mais utilizados são o OSB, a placa cimentícia e o gesso acartonado.

Independentemente do acabamento final, as placas externas deverão ser protegidas externamente da umidade e da água através de manta ou membrana de polietileno de alta densidade, que reveste toda a área externa das placas, garantindo a estanqueidade das paredes, porém permitindo a passagem da umidade da parte interna dos painéis para o exterior, evitando a condensação dentro dos mesmos (SANTIAGO, FREITAS E CRASTO, 2012, p. 80).

As placas de OSB apresentam grande versatilidade para construções em LSF, devido as suas características como alta resistência, baixo peso, fácil manuseio e instalação, sem necessidade de equipamentos específicos. Segundo Rego (2012), as placas OSB são compostas por lascas de madeiras com cerca de 10cm de comprimentos orientadas em três camadas perpendiculares, o que aumenta sua resistência mecânica e rigidez. Essas lascas são misturadas com resinas e prensadas a alta pressão e alta temperatura, unindo-as e conferindo-lhes resistência à humidade.

De acordo com Prudêncio (2017) essas placas podem ser empregadas para composição do fechamento vertical de painéis, para foros pisos e como substrato para cobertura de telhado, conforme observado na Figura 2.

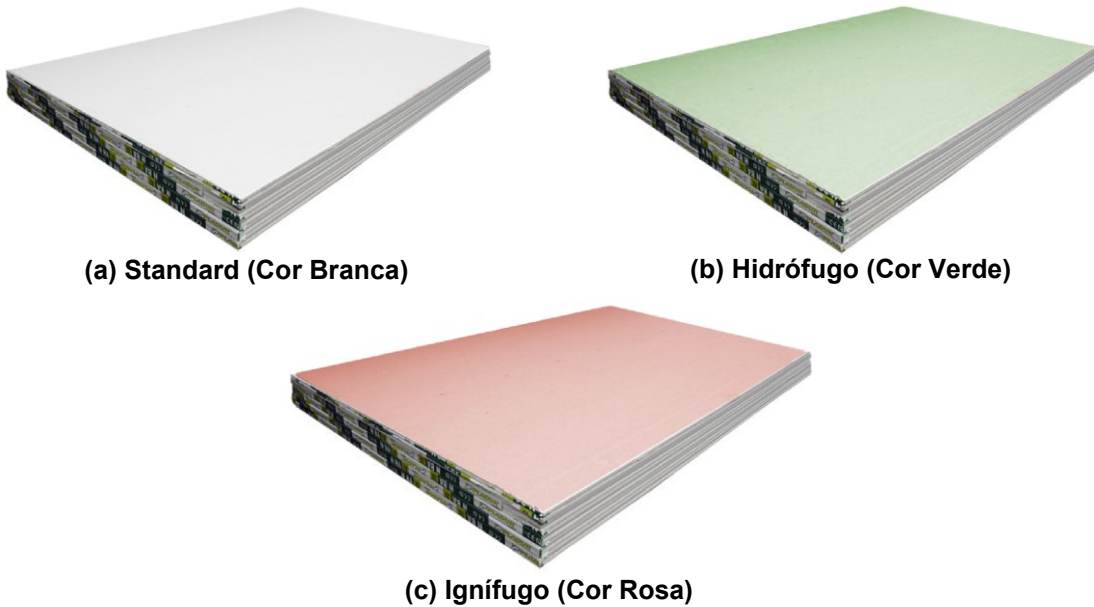
Figura 2 - Edificação com fechamento externo em placas de OSB.



Fonte: Espaço Smart (2019, p. 1).

Para Gaspar (2013) outra opção de fechamento bastante utilizada no sistema LSF são as placas de gesso acartonado, normalmente utilizadas para separação de espaços internos das edificações, uma vez que este tipo de placa não possui funções estruturais e devem estar protegidas contra intempéries. Normalmente as placas de gesso acartonado têm medidas de 120mm de largura por 1800 a 3000mm de comprimento e espessuras de 9,5, 12,5 e 15mm, sendo disponibilizadas como placas para áreas secas (standard), placas resistentes à umidade (hidrófugo) e placas resistentes ao fogo (ignífugo), conforme observado na Figura 3.

Figura 3 - Tipos de placa de gesso acartonado.



Fonte: Gaspar (2013, p. 21).

De acordo com Santiago, Freitas e Crasto (2012) as placas cimentícias podem ser utilizadas como fechamento externo ou interno dos painéis, principalmente em áreas molhadas e exposta a intempéries. As placas utilizadas no sistema LSF são comercializadas com uma largura fixa de 1200mm por 2000 a 3000mm de largura e espessuras de 6, 8 e 10mm de acordo com sua função, conforme observado no Quadro 2.

Quadro 2 - Relação entre espessura e aplicação da placa cimentícia.

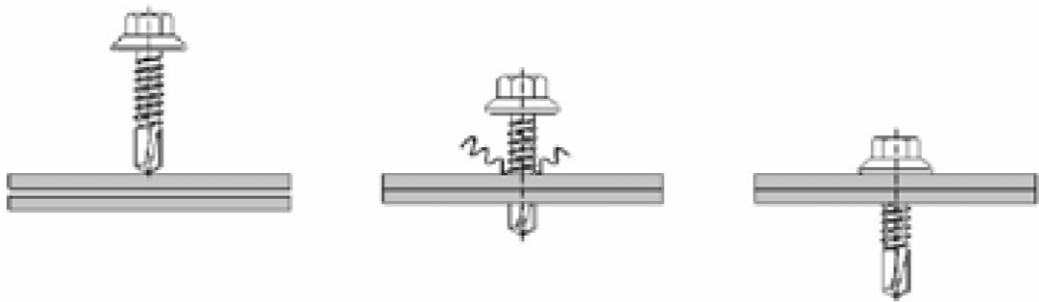
Espessura da placa	Aplicação Usual
6 mm	Podem ser aplicadas em divisórias leves e paredes secas internas, onde não existam aplicações de cargas suportadas diretamente pela placa.
8 mm	Podem ser aplicadas em divisórias leves e paredes internas e externas, em áreas secas e úmidas, podendo existir aplicações de cargas suportadas pela placa.
10 mm	Utilizadas para áreas secas e molhadas, internas ou externas. Ideal para paredes estruturais, melhorando a resistência contra impactos, aplicações de carga e isolamentos termoacústico.

Fonte: Santiago, Freitas e Crasto (2012, p. 85).

4.1.3 Ligações

Os parafusos utilizados na fixação desse sistema são denominados autoperfurantes e autoatarraxantes, uma vez que executam em uma só operação o furo e a fixação desejada, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Operação de fixação de um parafuso utilizado no sistema LSF.



Fonte: Rodrigues (2006, p. 60).

De acordo com Santiago, Freitas e Crasto (2012) definimos a ponta do parafuso observando a espessura da chapa de aço a ser perfurada. Chapas com espessura até 0,84mm utilizam parafusos com ponta agulha (Figura 5.a). Espessuras maiores do que 0,84mm utilizam parafusos com ponta broca (Figura 5.b), recomendado para conexões de várias camadas de materiais e ligações de perfis estruturais.

Figura 5 - Tipos de pontas de parafusos utilizados no LSF.



(a)

(b)

Fonte: Santiago, Freitas e Crasto (2012, p. 97).

Segundo Vitor (2012), ligações entre elementos metálicos utilizam parafusos com cabeça do tipo lentilha para ligações de montante com guia e sextavada para ligações entre painéis, pois sua geometria impede sua utilização em locais que serão fixadas placas de fechamento. Já as ligações das placas de fechamento aos perfis metálicos utilizam parafusos com cabeça tipo trombeta, uma vez que o formato da

cabeça permite a penetração nas placas de fechamento, proporcionando assim um melhor acabamento. Na Figura 6 é possível visualizar cada um dos parafusos.

Figura 6 - Tipos de cabeças de parafusos autobrocantes.



Fonte: Vitor (2012, p. 18).

Os parafusos são disponibilizados em uma série de tamanhos que vão do n° 6 ao n° 14. Esses elementos ainda contam com uma proteção em zinco a fim de evitar a corrosão e manter características semelhantes aos perfis metálicos (Rodrigues, 2006). A Tabela 2 apresenta algumas características geométricas importantes desses parafusos como a designação por bitolas, diâmetros e comprimentos.

Tabela 2 - Características geométricas dos parafusos usados no sistema LSF.

Bitola (#)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)
6	3,5	12,7 a 25,4
8	4,2	12,7 a 25,4
10	4,8	12,7 a 38,1
12	5,5	12,7 a 38,1
14	6,3	12,7 a 38,1

Fonte: Adaptado de Rego (2012, p. 47).

4.2 Estabilidade Global da Estrutura

De acordo com Santiago, Freitas e Crasto (2012), isoladamente os montantes não são capazes de resistir aos esforços horizontais que solicitam a estrutura. Visto que a perda de estabilidade ocasionada por esses esforços pode causar deformações ou até mesmo o colapso da edificação, torna-se necessário o emprego de algum dispositivo para este fim. Segundo os autores podem ser de dois tipos: contraventamentos ou o efeito diafragma rígido obtido pelos materiais de fechamento.

Santiago Freitas e Crasto (2012) salientam que o método mais utilizado é o contraventamento em “X”, o qual pode ser observado na Figura 7, concebido a partir da fixação de fitas metálicas nos cantos do painel de cisalhamento.

Figura 7 - Painel com contraventamento em “X”.



Fonte: Santiago, Freitas e Crasto (2012, p. 38).

De acordo com Santiago Freitas e Crasto (2012) as fitas metálicas devem ser dimensionadas para resistir ao esforço de tração oriundo do contraventamento e transmiti-lo à fundação do painel, para isso realizamos a fixação das fitas metálicas ao painel utilizando uma chapa de aço aparafusada ao montante, o qual está ancorado a fundação. Ainda segundo os autores, o ângulo em que a fita é instalada influencia sua capacidade de resistir aos esforços horizontais. Desta forma para garantir um melhor desempenho e eficiência do sistema segundo recomendações da ConsulSteel (2002), a inclinação das diagonais deve estar compreendida entre 30° e 60°.

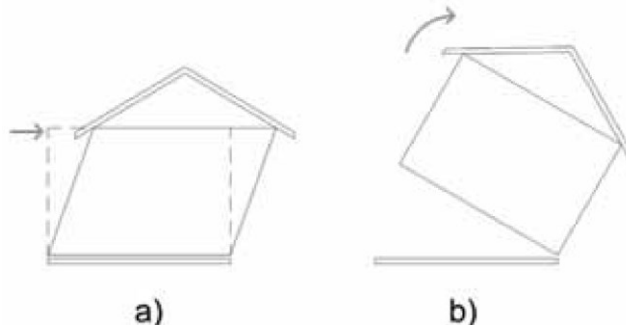
A utilização do contraventamento em “X” torna-se inadequada em alguns casos, devido a interferência causada por aberturas de portas ou janelas. Uma alternativa é o a utilização contraventamento em “K”, neste tipo de contraventamento as barras devem resistir às solicitações de compressão e de tração, alternadamente, carecendo ser utilizado o perfil U enrijecido. (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012).

Outra maneira de garantir a rigidez lateral necessária ao painel de cisalhamento é a utilização do sistema de diafragma rígido. Esse sistema consiste em usar placas estruturais no fechamento dos painéis, geralmente placas de OSB, as quais são responsáveis por resistir a maioria dos esforços provenientes da pressão do vento.

Segundo Tian, Wang e Lu (2004) as placas de OSB são responsáveis por 96% da resistência total dos painéis, restando aos perfis metálicos uma participação de apenas 4% da resistência total. Outros materiais de fechamento, como placas metálicas, de gesso ou cimentícias também contribuem para o ganho de rigidez no plano, de acordo com as características de cada uma.

Independentemente do método de contraventamento os painéis devem ser ancorados a fundação por dispositivos denominados de hold-down, afim de evitar movimentos de translação ou o tombamento da estrutura (Figura 8), decorrentes da pressão do vento que atinge os painéis. Na translação a estrutura desloca-se lateralmente devido a ação do vento, já no tombamento ocorre a elevação a estrutura seguida da rotação.

Figura 8 - Efeitos da carga de vento na estrutura: a) translação e b) tombamento.



Fonte: Santiago, Freitas e Crasto (2012, p. 28).

Segundo Santiago, Freitas e Crasto (2012) os tipos de ancoragem mais utilizados são: a ancoragem química com barra roscada (Figura 9) e a expansível com parabolt. A ancoragem química consiste na fixação de uma barra roscada ao concreto por meio de perfuração preenchida com uma resina química, e posteriormente utiliza-se um conector de ancoragem fixado a barra e a guia e ligado ao montante, que geralmente é duplo, através de parafusos.

Figura 9 - Conector de ancoragem com barra roscada “hold-down”.



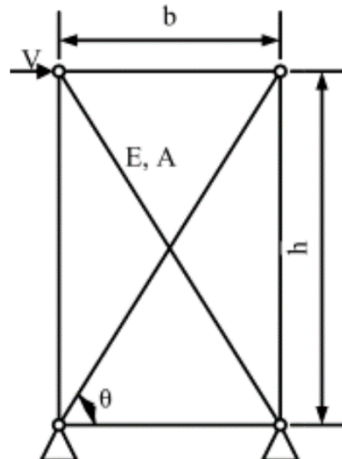
Fonte: Santiago, Freitas e Crasto, (2012, p. 28).

4.3 Modelos Simplificados Para Painéis de Cisalhamento

A utilização de um modelo simplificado fornece uma alternativa prática e eficiente para caracterizar a contribuição das placas de fechamento na modelagem de uma edificação, tendo em vista o tempo disponível dos projetistas.

Leng et al (2012) apresentam um modelo simplificado dos painéis de cisalhamento para análises sísmicas (Figura 10). Esse modelo representa um painel de cisalhamento por meio de barras rígidas articuladas e substitui as placas de fechamento por diagonais equivalentes sujeitas a deformação, sendo as únicas responsáveis por resistir aos esforços laterais.

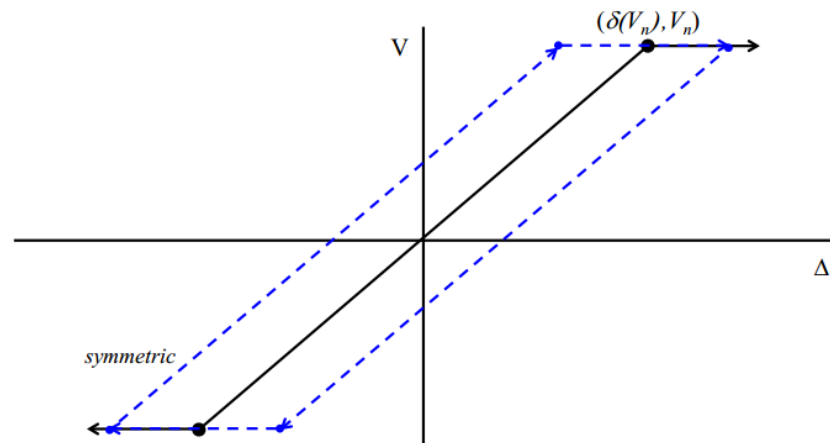
Figura 10 - Modelo simplificado para painéis de cisalhamento.



Fonte: Leng et al (2012, p. 808).

Em sua análise, os autores exploram dois tipos de comportamento para as diagonais equivalentes: um com comportamento Elástico Perfeitamente Plástico (EPP) e outro com comportamento multilinear. Segundo Pedrosa (2015), podemos definir o comportamento das diagonais considerando o modelo EPP, representado na Figura 11, uma vez que o presente trabalho não considera ações sísmicas.

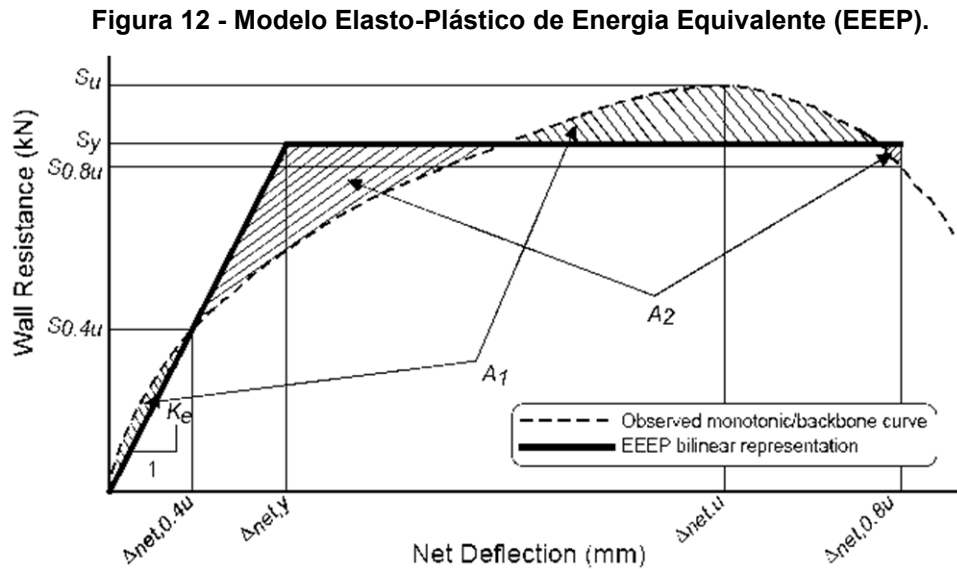
Figura 11 - Modelo EPP considerado para painéis de cisalhamento.



Fonte: Leng et al (2012, p. 810).

De acordo Pedrosa (2015), no modelo EPP assumimos a inclinação inicial com base no ponto de coordenadas $(\delta(0,4 R_n); 0,4 R_n)$ e a força resistente limite (V_n) , como sendo aquela que confira ao modelo simplificado a mesma energia de deformação absorvida pela estrutura no ensaio de cisalhamento, ou no modelo numérico, utilizado como base. Para que esta hipótese seja verdadeira, as áreas abaixo das curvas

obtidas pelo modelo EPP e pelo ensaio de cisalhamento do painel, ou modelo numérico, devem ser iguais. Essa metodologia tem como base o Modelo Elasto-Plástico de Energia Equivalente (EEEP) da norma AISI S213 (AISI,2007), ilustrado pela Figura 12.



Fonte: AISI S213 (2007, p. 13).

Para se igualar a energia de deformação (U) resultante do modelo simplificado à da curva obtida com ensaio de cisalhamento, ou simulações computacionais, devemos obter a força resistente limite adequada, de acordo com a Equação 1. Onde o δ_f é o deslocamento correspondente a aplicação de uma força com 80% da resistência última do painel.

$$U = \frac{\delta_f + (\delta_f - \delta(V_n))}{2} \cdot V_n \quad \text{Equação 1}$$

Segundo Pedrosa (2015), o deslocamento para a força V_n aplicada, chamado $\delta(V_n)$, pode ser calculado utilizando a relação trigonométrica a partir da tangente do ângulo de inclinação da reta inicial do gráfico, de acordo com a Equação 2.

$$\delta(V_n) = \frac{V_n}{tg(\theta)} \quad \text{Equação 2}$$

Como a inclinação inicial é obtida a partir do ponto da curva original em que a força cisalhante aplicada é igual a 40% da resistência última do painel de cisalhamento, cujas coordenadas são $(\delta(0,4 R_n); 0,4 R_n)$, então a $tg(\theta)$ é dada pela Equação 3.

$$tg(\theta) = \frac{0,4 R_n}{\delta(0,4 R_n)} \quad \text{Equação 3}$$

Substituindo as Equações 3 em 2, e depois em 1, é possível obter a Equação 4, com a qual se calcula o valor de V_n , que resulta em uma energia de deformação equivalente.

$$\frac{V_n}{2 \cdot \left(\frac{0,4 R_n}{\delta(0,4 R_n)} \right)} - \delta_f \cdot V + U = 0 \quad \text{Equação 4}$$

A AISI S213 (AISI, 2007) apresenta uma metodologia para o cálculo da resistência lateral dos painéis de LSF através de valores tabelados. Esses valores tem como base resultados obtidos por ensaios experimentais, portanto apresentam algumas limitações. Como, por exemplo, dimensões mínimas de perfis e parafusos, recomendações para detalhes construtivos e espaçamento entre montantes.

Tabela 3 - Resistência nominal ao cisalhamento para carregamentos de vento e outros atuantes no plano de painéis de cisalhamento.

Descrição do conjunto	Máxima relação altura/largura (h/b)	Espaçamento entre parafusos nas bordas da placa ² (mm)			
		150	100	75	50
Placa <i>plywood</i> Estrutural 1 - 15/32" (4-ply), uma face	2:1	15,54 ³	-	-	-
OSB 7/16" painel classificado, uma face	2:1	13,28 ³	20,58	25,32	27,87
OSB 7/16" painel classificado, uma face orientada perpendicular aos montantes	2:1	14,89	-	-	-
OSB 7/16" painel classificado, uma face	2:1 ⁵	-	14,96	20,80	26,63
Placa metálica 0,018", uma face	2:1	7,08	-	-	-
Placa metálica 0,027", uma face	4:1	-	14,59	15,83	17,07

Fonte: Pedrosa (2015, p. 109).

A Tabela 3 informa o valor da resistência nominal unitária ao cisalhamento (r_n) em função do tipo e disposição da placa do revestimento, da relação entre a altura e largura do painel e do espaçamento entre parafusos nas bordas. Para se obter a resistência lateral do painel (R_n) é necessário multiplicar o valor de r_n pela largura da parede (b) conforme a Equação 5.

$$R_n = r_n \cdot b \quad \text{Equação 5}$$

Também se observa na AISI S213 (AISII, 2007) a Equação 6, utilizada para o cálculo do deslocamento lateral resultante do esforço cisalhante aplicado. Assim, podemos determinar os deslocamentos referentes a aplicação de uma força correspondente a 80% e a 40% da resistência última do painel.

$$\delta = \frac{2 \cdot v \cdot h^3}{3 \cdot E_s \cdot A_c \cdot b} + \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \frac{v \cdot h}{\rho \cdot G \cdot t_p} + \omega_1^{\frac{5}{4}} \cdot \omega_2 \cdot \omega_3 \cdot \omega_4 \cdot \left(\frac{v}{0,0029 \cdot \beta} \right)^2 + \frac{h}{b} \cdot \delta_v \quad \text{Equação 6}$$

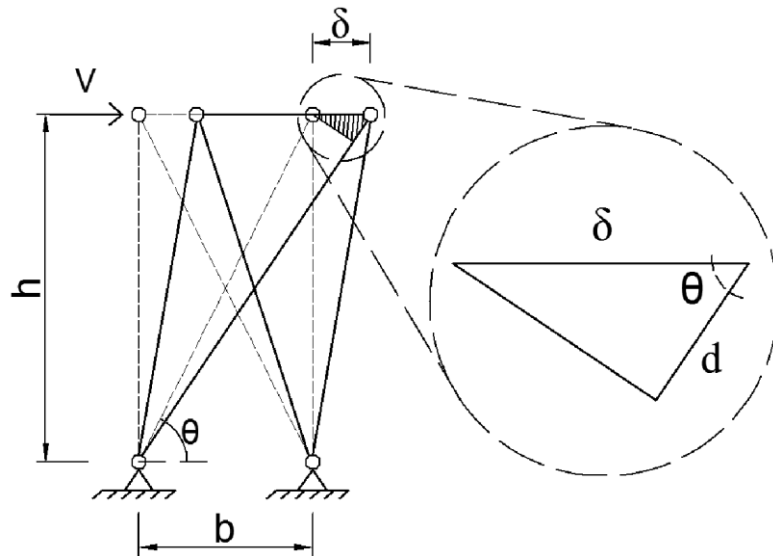
Deste modo, substituindo os devidos valores na Equação 4 conseguimos determinar a força resistente limite adequada, sendo ela aplicada ao painel para determinar o módulo de elasticidade (E) e a área da seção transversal (A) das diagonais, que representem a contribuição adequada do painel com a placa de fechamento para rigidez da estrutura.

De acordo com Pedrosa (2015), arbitrando-se a área da seção, podemos calcular módulo de elasticidade, a partir da relação exposta na Equação 7.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{Equação 7}$$

Pedrosa (2015) propõem uma adaptação ao modelo concebido por Leng et al. (2012), considerando apenas a barra superior rígida e não utilizando a barra inferior do quadro. Dessa forma é possível encontrar a deformação axial (ε) das diagonais, utilizando uma aproximação para casos de pequenos deslocamentos, conforme exposto na Figura 13.

Figura 13 - Aproximação para pequenos deslocamentos.



Fonte: Pedrosa (2015, p. 87).

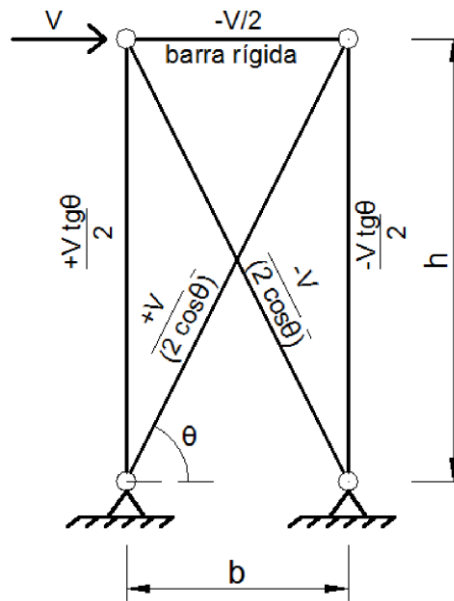
Deste modo, com a Equação 8, se obtém a deformação axial da diagonal.

$$\varepsilon = \frac{d}{l} = \frac{\delta \cdot \cos\theta}{\sqrt{b^2 + h^2}} = \frac{\delta \cdot b}{b^2 + h^2} \quad \text{Equação 8}$$

Onde b é a largura do painel, h é a altura, l é o comprimento da diagonal, d é o alongamento da diagonal, θ é o ângulo entre as diagonais e a horizontal, e δ é o deslocamento lateral do painel, o qual pode ser obtido numericamente, com a aplicação do método previsto pela AISI S213 (AISI, 2007), utilizando a Equação 6.

Podemos definir a tensão axial nas diagonais (σ), como a razão entre o esforço normal (F) que age na diagonal e sua área arbitrada. De acordo com Pedrosa (2015), o esforço normal pode ser obtido resolvendo-se a estrutura hiperestática da Figura 14.

Figura 14 - Esforços normais no painel simplificado.



Fonte: Pedrosa (2015, p. 88).

Com as forças normais apresentadas na Figura 14, a tensão nas diagonais é dada pela Equação 9, resultado idêntico ao de Leng et al. (2012).

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{V}{2 \cdot \cos\theta} = \frac{V \sqrt{b^2 + h^2}}{2A b} \quad \text{Equação 9}$$

Dessa forma, o cálculo do módulo de elasticidade das diagonais equivalentes pode ser efetuado, arbitrando-se uma área convenientemente, e substituindo as Equações 8 e 9 na equação 10.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Equação 10}$$

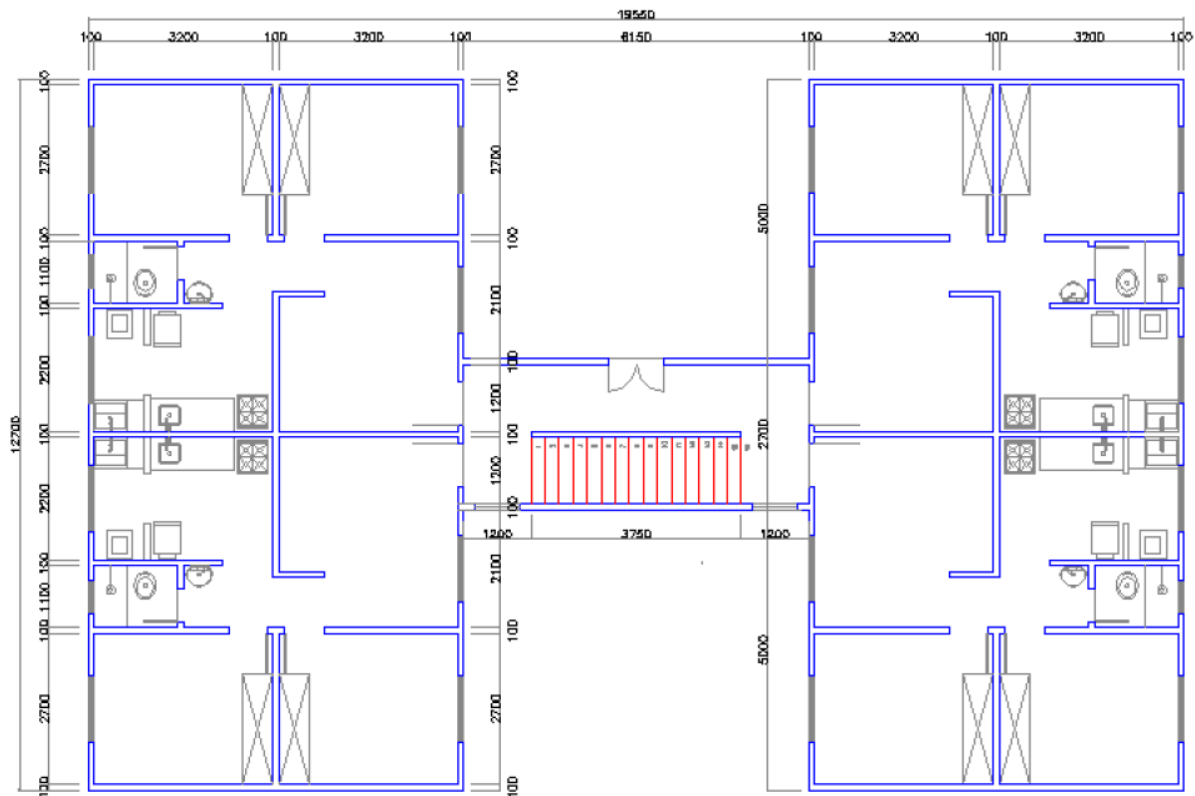
Assim conseguimos obter as propriedades necessárias para realizar a modelagem numérica da edificação, considerando a contribuição dos painéis OSB para a rigidez da estrutura.

5 ESTUDO DE CASO

5.1 Introdução

Com o intuito de avaliar comparativamente o desempenho da análise adotada por Bevilaqua (2005) com o método utilizado no presente trabalho, foi tomado para estudo uma das edificações propostas pela autora. A edificação é composta por 7 pavimentos, contendo 4 unidades habitacionais por pavimento. Neste projeto, cada unidade habitacional conta com uma área total de 46,69 m², dividida em sala, dois quartos, circulação, banheiro, cozinha e área de serviço. As dimensões do projeto podem ser observadas na Figura 15.

Figura 15 - Planta Baixa do pavimento tipo do modelo.



Fonte: Bevilaqua (2015, p. 87).

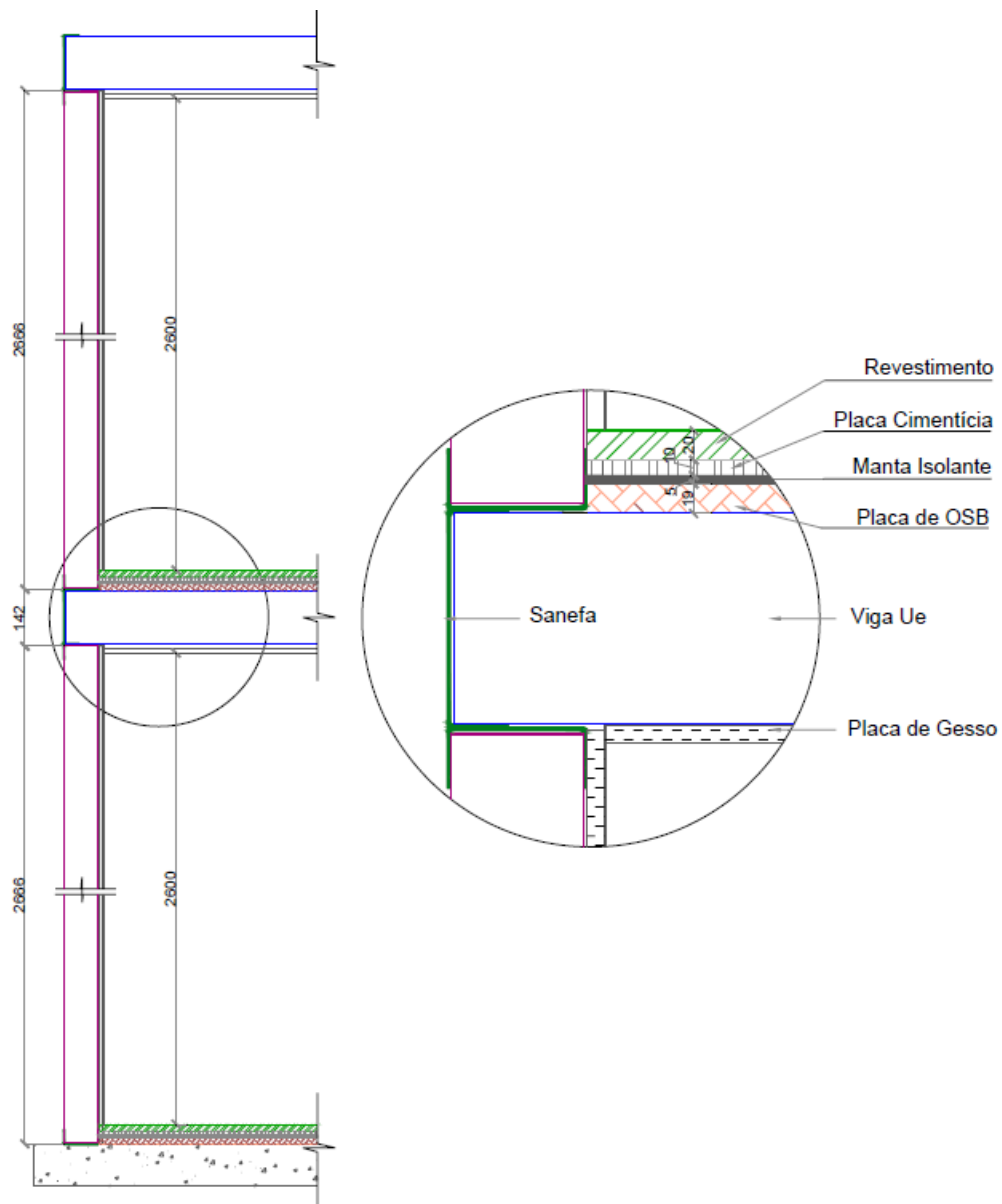
Neste modelo a autora opta por utilizar montantes com espaçamento equidistantes de 400mm, piso do tipo seco formado por uma composição de placas de OSB e placas cimentícias, fechamento interno com placas de gesso acartonado e placas de OSB para os fechamentos externos.

5.2 Características estruturais do modelo

5.2.1 Pisos

Foi utilizado o sistema de piso seco, composto por placas de OSB e placas cimentícias, garantido a estrutura uma boa capacidade de isolamento termoacústico. Na Figura 16 observar-se a composição do piso, onde uma placa de OSB com 19mm de espessura é parafusada à viga metálica, sobre as placas de OSB é colocada uma manta e em seguida uma placa cimentícia de 10mm de espessura.

Figura 16 - Configuração de piso seco utilizada no projeto.



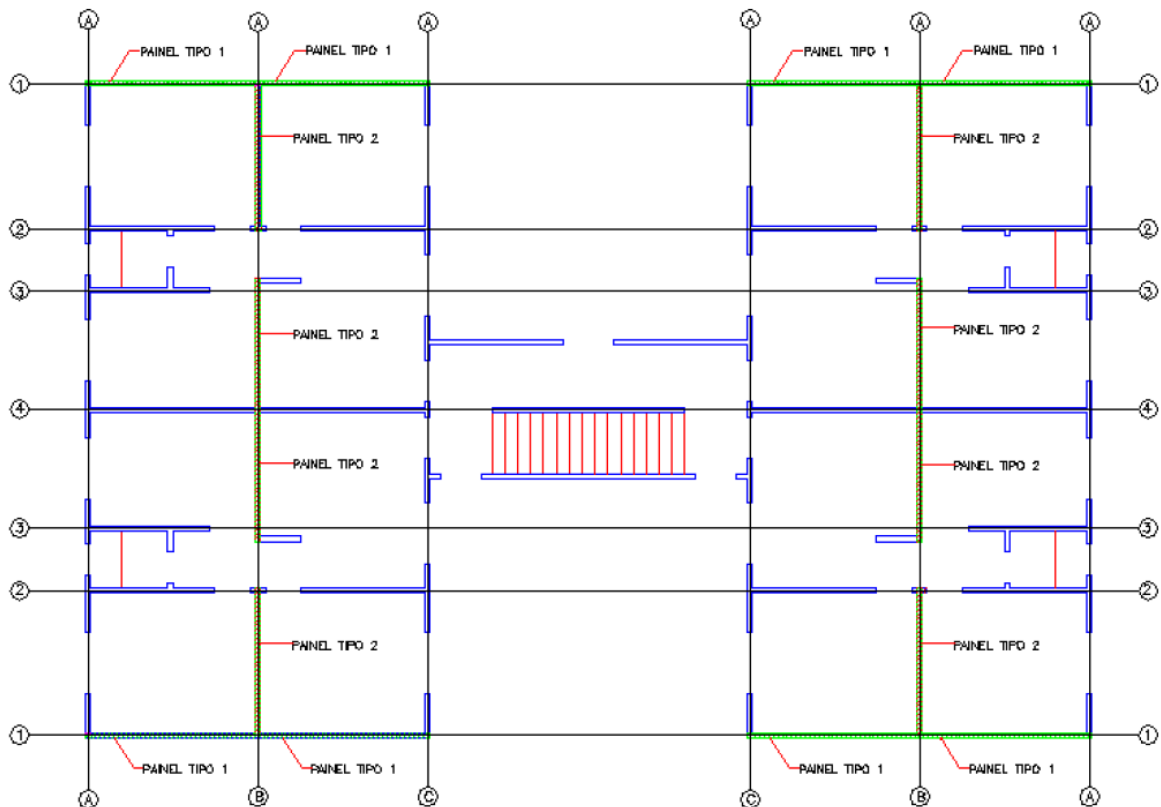
Fonte: Bevilaqua (2005, p. 98).

Segundo Bevilaqua, a manta possui a dupla função de isolamento acústico e impermeabilização, impedindo que a umidade passe pelo revestimento superior entre em contato com as placas. A autora justifica que a utilização de placas cimentícias ocorre, pois, a manta não oferece uma superfície favorável à formação de uma camada de interação entre argamassa e substrato, não permitindo uma boa fixação das peças de cerâmica.

5.2.2 Painéis de parede

Bevilaqua utiliza placas de OSB com 12mm de espessura para os fechamentos externos e nas paredes de divisórias entre apartamentos, já os fechamentos internos são realizados utilizando-se placas de gesso acartonado. A fixação das placas de OSB ocorre por meio de parafusos estruturais, possuindo um espaçamento entre si de 150mm no perímetro externo das placas e 300mm ao longo dos montantes intermediários.

Figura 17 - Tipos de painéis diafragmas de OSB.



Fonte: Bevilaqua (2005, p. 111).

Na análise foi considerado duas diferentes composições de painéis, conforme observado na Figura 17. Uma com 12mm de espessura, considerando placas de OSB apenas nas faces externas (painéis TIPO 1) e outra com 24mm de espessura, com placas de OSB nas duas faces dos painéis (painéis TIPO 2). Em ambos os casos os painéis possuem dimensões de 3300mm x 2800mm.

5.3 Ações e combinações de ações

A estrutura estudada está submetida às ações permanentes, que correspondem às cargas devido ao peso próprio da estrutura do prédio (composta pelos pisos, painéis de parede e telhado), ações de sobrecargas e cargas devidas ao vento.

5.3.1 Ações de pisos

As ações dos pisos foram lançadas diretamente sobre as vigas, que receberam cargas lineares. Estes valores foram multiplicados pelas devidas larguras de influência de cada viga.

- *Carregamento permanente* (para os pisos dos pavimentos tipo)

Placa de gesso acartonado: forro sob vigas espessura de 12,5mm	0,12 kN/m ²
Placa de OSB (espessura de 19mm)	0,12 kN/m ²
Manta (espessura de 5mm)	0,05 kN/m ²
Placa cimentícia (espessura de 10mm)	0,14 kN/m ²
Revestimento cerâmico (c/ 20mm de argamassa de assentamento)	0,50 kN/m ²
TOTAL	0,93 kN/m²

- *Sobrecarga* (para os pisos dos pavimentos tipo) 1,50 kN/m²

Para a laje de cobertura do último pavimento, que serve de apoio à estrutura do telhado, as considerações de carga foram alteradas:

- *Carregamento permanente* (para laje de cobertura)

Placa de gesso acartonado + Placa de OSB + Manta + Placa cimentícia + Camada de regularização de argamassa	0,65 kN/m ²
Engradamento metálico do telhado	0,12 kN/m ²
Telha de fibrocimento	0,05 kN/m ²
TOTAL	0,83 kN/m²

- *Sobrecarga* (para laje de cobertura)

Aplicada a laje de cobertura	0,12 kN/m ²
Correspondente ao telhado	0,05 kN/m ²
TOTAL	0,83 kN/m²

5.3.2 Ações permanentes nos painéis de paredes

Os painéis de paredes estão submetidos a dois tipos diferentes de ações, cargas permanentes e acidentais. As permanentes são relativas ao peso próprio das placas de fechamento e aos revestimentos sobre elas aplicados, já as acidentais são referentes a pressão dinâmica de vento.

Assim, as ações permanentes atuantes nos montantes metálicos podem apresentar as seguintes parcelas:

- *Ações permanentes para painéis de paredes externas*

OSB (ext. 12mm) + gesso (int. 12,5mm) + Revestimento Externo	0,25 kN/m ²
OSB (ext. 12mm) + gesso (int. 12,5mm) + Revestimento Externo + Revestimento cerâmico interno	0,50 kN/m ²

- *Ações permanentes para painéis de paredes internas*

Placa de gesso (2 lados x 12,5mm)	0,15 kN/m ²
---	------------------------

5.3.3 Pressão dinâmica do vento

Bevilaqua, utiliza-se das prescrições da ABNT NBR 6123:1988 para determinar ação do vento a ser aplicado a edificação. As condições adotadas para a determinação destas ações são as seguintes:

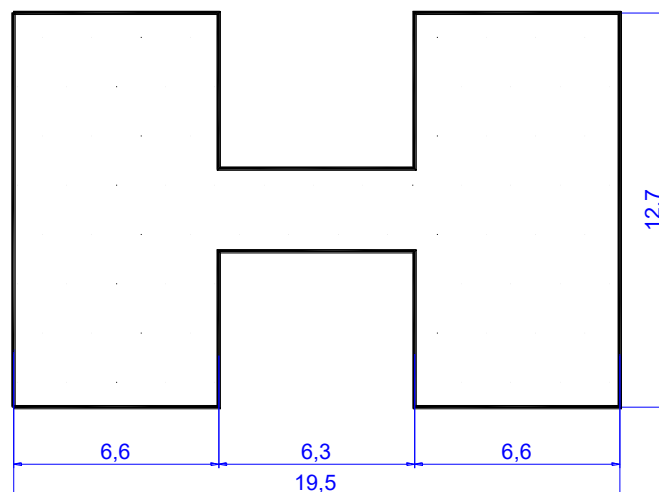
- *Características geométricas da estrutura*

$a = 19,50 \text{ m}$

$b = 12,70 \text{ m}$

$h = 19,60 \text{ m}$

Figura 18 - Dimensões em planta do prédio (m).



Fonte: Bevilaqua (2005, p. 128).

- *Velocidade básica do vento (V_0)*

$V_0 = 35 \text{ m/s}$ (velocidade do vento na região de Belo Horizonte – MG)

- *Topográfico (S_1)*

Terreno plano ou fracamente acidentado: $S_1 = 1,0$

- *Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (S_2)*

Categoria IV: terreno coberto por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal.

Classe A: nenhuma dimensão, horizontal ou vertical excede 20 metros.

Tabela 4 - Coeficientes para fator S_2 .

z (m)	S_2
≤ 5	0,79
10	0,86
15	0,90
20	0,93

Fonte: Bevilaqua (2005, p. 129).

- *Fator estatístico (S_3)*

Edificações residenciais: $S_3 = 1,0$

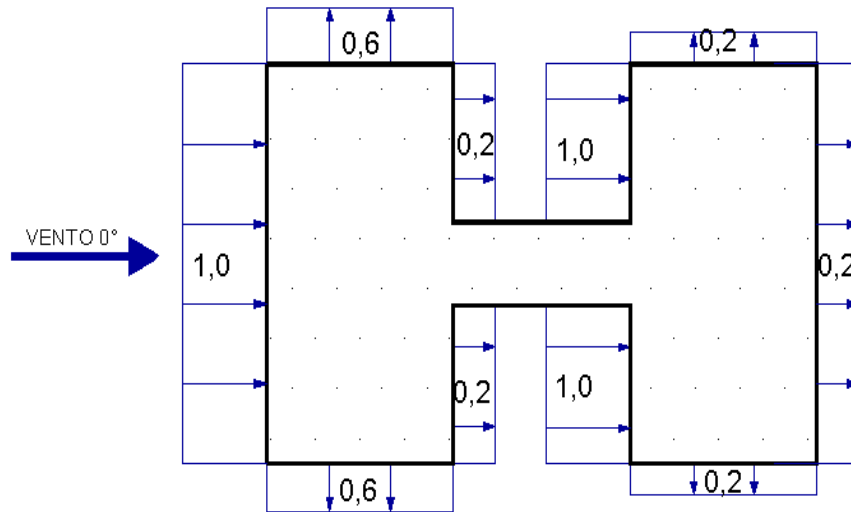
A Tabela 5 apresenta um resumo do cálculo da pressão final efetiva de vento, para os casos de vento frontal (Figura 19) e vento lateral (Figura 20). As ações foram aplicadas aos montantes dos painéis externos, como ações lineares verticalmente distribuídas. Para isto, os valores das pressões mostradas na Tabela 5 foram multiplicados pela largura de influência dos montantes, ou seja, 400mm.

Tabela 5 - Pressão final devida ao carregamento de vento nas paredes.

ALTURA (Z) EM M	C_p	PRESSÃO FINAL (N/m²)
0 – 5	0,2	93,78
	0,6	281,35
	1,0	468,92
5 – 10	0,2	111,05
	0,6	333,14
	1,0	555,24
10 - 15	0,2	121,64
	0,6	364,93
	1,0	608,22
15 - 20	0,2	121,64
	0,6	364,93
	1,0	608,22

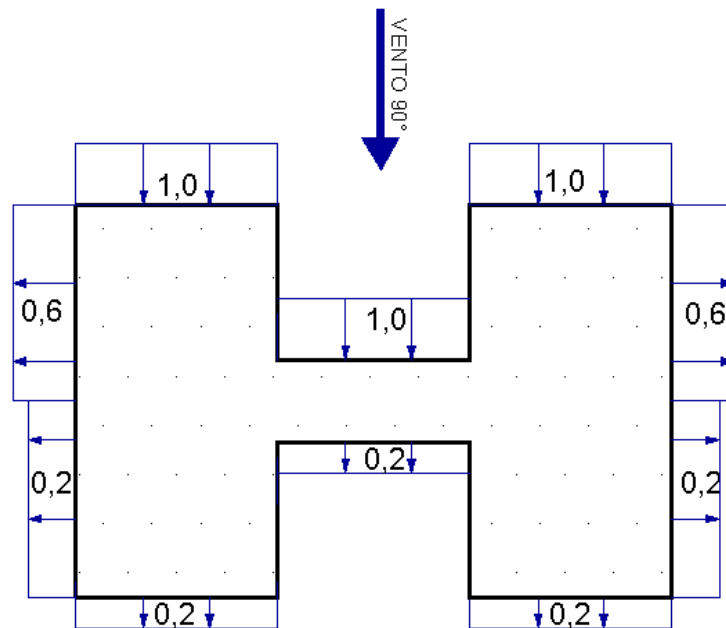
Fonte: Adaptado Bevilaqua (2005, p. 132).

Figura 19 - Coeficientes finais para o cálculo da pressão de vento frontal.



Fonte: Bevilaqua (2005, p. 133).

Figura 20 - Coeficientes finais para o cálculo da pressão de vento lateral.



Fonte: Bevilaqua (2005, p. 133).

5.3.4 Combinações de ações

As ações adotadas para a análise estrutural do modelo, e descritas nos itens anteriores deste capítulo, são características. Para realizar as combinações dessas ações, Bevilaqua utiliza os critérios constantes na NBR 14762 (2001), resultando nas seguintes combinações:

- *Combinações de ações para os estados limites últimos (ELU)*

$$\text{COMB1} = 1,3 \times F_{g,k} + 1,4 \times F_{q1,k} + 1,4 \times 0,40 \times F_{q2,k}$$

$$\text{COMB2} = 1,3 \times F_{g,k} + 1,4 \times 0,56 \times F_{q1,k} + 1,4 \times F_{q2,k}$$

$$\text{COMB3} = 1,0 \times F_{g,k} + 1,4 \times F_{q1,k}$$

- *Combinações de ações para os estados limites de serviço (ELS)*

$$\text{COMB4} = 1,0 \times F_{g,k} + 0,2 \times F_{q2,k}$$

$$\text{COMB5} = 1,0 \times F_{g,k} + 0,2 \times F_{q1,k} + 0,2 \times F_{q2,k}$$

$$\text{COMB6} = 1,0 \times F_{g,k} + 1,0 \times F_{q1,k}$$

Onde:

$F_{g,k}$: é o somatório de todas as ações permanentes na estrutura, incluindo o peso próprio dos perfis metálicos;

$F_{q1,k}$: é o carregamento horizontal devido à ação do vento;

$F_{q2,k}$: é a sobrecarga atuante na estrutura.

5.4 Considerações para os Materiais

5.4.1 Perfis Metálicos

Os perfis adotados no projeto seguem as seguintes premissas:

- Módulo de elasticidade do aço (E_s): 200 GPa;
- Resistência ao escoamento do aço (f_y): 230 MPa;
- Limite de ruptura do aço na tração (f_u): 440 MPa;
- Camada de revestimento de zinco: 0,04 mm total, nas duas faces;

As resistências dos perfis foram calculadas considerando-se a espessura líquida de aço, isto é, subtraindo-se da espessura nominal do perfil a camada de zinco (0,02mm) em cada face da chapa de aço. A Tabela 6 apresenta os resultados das resistências dos perfis utilizados como montantes.

Tabela 6 - Resistências à compressão dos perfis utilizados como montantes.

PERFIL (mm)	ESPESSURA (mm)	ÁREA DA SEÇÃO (cm ²)	N _{c,Rd} (kN)
Ue 90x40x12 - 0,80	0,76	1,34	10,42
Ue 90x40x12 - 0,95	0,91	1,71	13,16
Ue 90x40x12 - 1,25	1,21	2,25	10,09
Ue 90x40x12 - 1,55	1,51	2,78	26,04

Fonte: Adaptado de Bevilaqua (2005, p. 147).

Procedimento análogo foi utilizado para a determinação das resistências de cálculo dos perfis das vigas, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Resistências dos perfis utilizados para as vigas.

PERFIL (mm)	ÁREA DA SEÇÃO (cm ²)	V _{Rd} (kN)	M _{Rd} (kN.m)
Ue 140x40x12 - 0,95	2,26	5,67	1,68
Ue 140x40x12 - 1,25	2,95	13,03	2,38

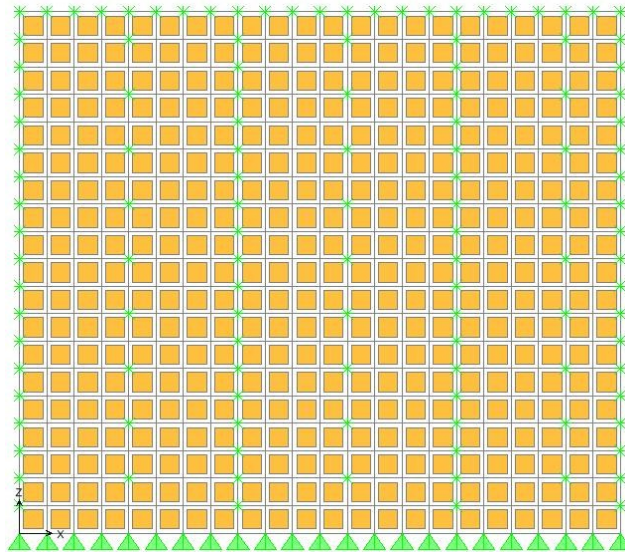
Fonte: Adaptado de Bevilaqua (2005, p. 147).

5.4.2 Placas de OSB

A Figura 21 apresenta a discretização do painel de OSB proposto por Bevilaqua, o qual segue os seguintes parâmetros:

- Módulos de elasticidade longitudinal (E_x) e vertical (E_z) = 3500 N/mm²
- Módulo de elasticidade transversal (E_y) = 1400 N/mm²
- Módulo de elasticidade ao cisalhamento transversal (G_{xy}) = 1730,3 N/mm²
- Módulo de cisalhamento longitudinal (G_{xx}, G_{yz}) = 340 N/mm²
- Resistência média à tração por flexão ou módulo de ruptura longitudinal = 22 N/mm²
- Resistência média à tração por flexão ou módulo de ruptura transversal = 11 N/mm²
- Densidade do material = 6,28 N/mm³
- Coeficiente de Poisson longitudinal (ν_x) e vertical (ν_z) = 0,25
- Coeficiente de Poisson transversal (ν_y) = 0,1

Figura 21 - Painel de OSB discretizado.

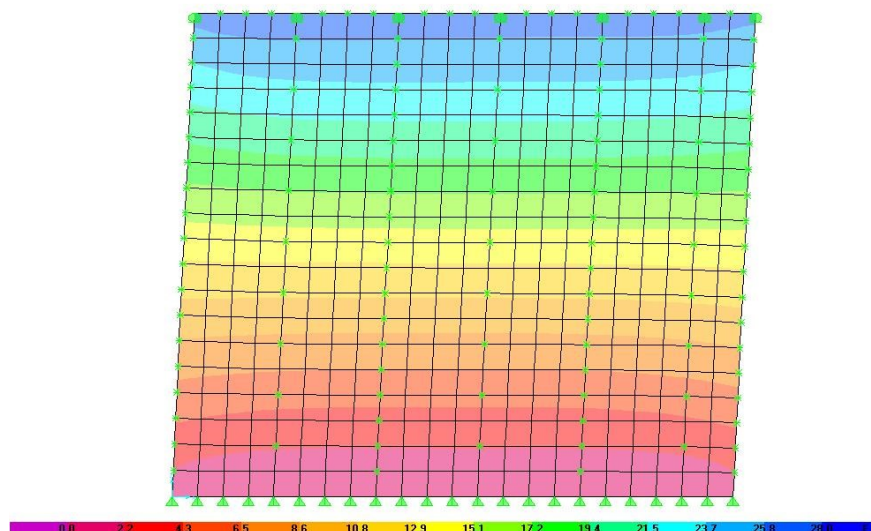


Fonte: Bevilaqua (2005, p. 111).

Os pontos em verde, observados na Figura 21, representam as posições dos parafusos. No perímetro externo das placas de OSB os parafusos estruturais possuem um espaçamento de 150mm entre si, já nos montantes intermediários o espaçamento adotado foi de 300mm.

O painel proposto pela autora foi considerado simplesmente apoiado em sua base, todos os pontos que possuem parafusos tiveram a rotação restringida em torno do eixo X, em torno do eixo Z e o deslocamento em Y.

Figura 22 - Deslocamentos ($\times 10^{-2}$ mm) para o painel de 3300mm x 2800mm.



Fonte: Bevilaqua (2005, p. 115).

Desse modo, foi aplicado uma carga de 1 kN no topo do painel, o qual apresentou a distribuição de deslocamentos observado na Figura 22. Verifica-se que o deslocamento máximo obtido no topo do painel foi de 0,273mm no eixo X.

5.5 Elementos estruturais adotados na edificação

5.5.1 Montantes

Os perfis adotados por Bevilaqua (2005) são listados do Quadro 3 ao 8.

Quadro 2 - Perfis utilizados como montantes do 1º pavimento.

ELEMENTO		PERFIL UTILIZADO
EIXO 1	Montante canto	3x Ue 90x40x12x0,95
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x0,95
EIXO 2	Montante canto	4x Ue 90x40x12x0,95
	Montante intermediário	2x Ue 90x40x12x0,95
EIXO 3 / 4	Montante canto	2x Ue 90x40x12x1,55
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x1,55
FILA A / B / C	Montante canto	2x Ue 90x40x12x0,95
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x0,95

Fonte: Adaptado de Bevilaqua (2005, p. 198).

Quadro 3 - Perfis utilizados como montantes do 2º pavimento.

ELEMENTO		PERFIL UTILIZADO
EIXO 1	Montante canto	3x Ue 90x40x12x0,95
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x0,95
EIXO 2	Montante canto	4x Ue 90x40x12x0,95
	Montante intermediário	2x Ue 90x40x12x0,95
EIXO 3/4	Montante canto	2x Ue 90x40x12x1,55
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x1,55
FILA A/B/C	Montante canto	2x Ue 90x40x12x0,95
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x0,95

Fonte: Adaptado de Bevilaqua (2005, p. 199).

Quadro 4 - Perfis utilizados como montantes do 3º pavimento.

ELEMENTO		PERFIL UTILIZADO
EIXO 1	Montante canto	3x Ue 90x40x12x0,80
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x0,80
EIXO 2	Montante canto	4x Ue 90x40x12x0,80
	Montante intermediário	2x Ue 90x40x12x0,80
EIXO 3/4	Montante canto	2x Ue 90x40x12x1,25
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x1,25
FILA A/B/C	Montante canto	2x Ue 90x40x12x0,80
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x0,80

Fonte: Adaptado de Bevilaqua (2005, p. 199).

Quadro 5 - Perfis utilizados como montantes do 4º pavimento.

ELEMENTO		PERFIL UTILIZADO
EIXO 1	Montante canto	3x Ue 90x40x12x0,80
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x0,80
EIXO 2	Montante canto	2x Ue 90x40x12x1,55
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x1,55
EIXO 3/4	Montante canto	2x Ue 90x40x12x1,25
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x1,25
FILA A/B/C	Montante canto	2x Ue 90x40x12x0,80
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x0,80

Fonte: Adaptado de Bevilaqua (2005, p. 200).

Quadro 6 - Perfis utilizados como montantes do 5º pavimento.

ELEMENTO		PERFIL UTILIZADO
EIXO 1	Montante canto	3x Ue 90x40x12x0,80
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x0,80
EIXO 2	Montante canto	2x Ue 90x40x12x1,25
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x1,25
EIXO 3/4	Montante canto	2x Ue 90x40x12x0,95
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x0,95
FILA A/B/C	Montante canto	2x Ue 90x40x12x0,80
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x0,80

Fonte: Adaptado de Bevilaqua (2005, p. 200).

Quadro 7 - Perfis utilizados como montantes do 6° pavimento.

ELEMENTO		PERFIL UTILIZADO
EIXO 1	Montante canto	3x Ue 90x40x12x0,80
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x0,80
EIXO 2	Montante canto	2x Ue 90x40x12x0,95
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x0,95
EIXO 3/4	Montante canto	2x Ue 90x40x12x0,80
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x0,80
FILA A/B/C	Montante canto	2x Ue 90x40x12x0,80
	Montante intermediário	Ue 90x40x12x0,80

Fonte: Adaptado de Bevilaqua (2005, p. 201).

Para todos os montantes do 7° pavimento foi adotado o perfil Ue 90x40x12x0,80, uma vez que os esforços obtidos para os montantes desse pavimento são inferiores à resistência de cálculo do perfil.

5.5.2 Vigas

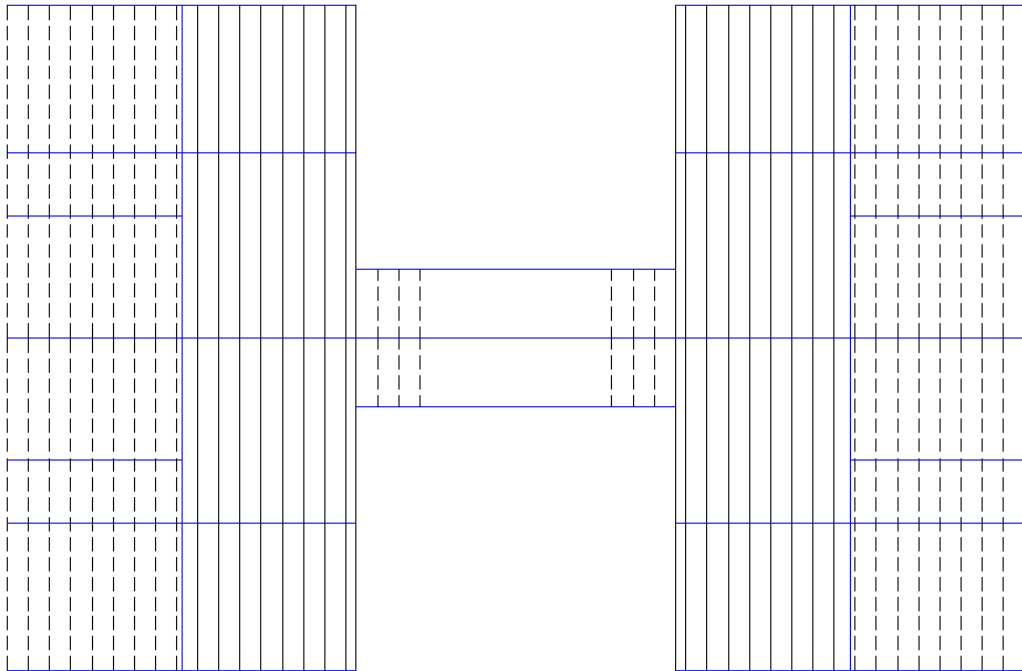
Os perfis utilizados para as vigas são apresentados no Quadro 8. Os vãos principais estão indicados na Figura 20 em linhas contínuas e os vãos intermediários estão indicados em linhas tracejadas.

Quadro 8 - Perfis utilizados como vigas.

ELEMENTO	PERFIL UTILIZADO
Viga Vão Maior	Ue 140x40x12x0,95
Viga Vão Intermediário	Ue 140x40x12x0,80

Fonte: Adaptado de Bevilaqua (2005, p. 201).

Figura 23 - Configuração dos perfis das vigas.



Fonte: Bevilaqua (2005, p. 201).

5.6 Resultados

Os deslocamentos máximos obtidos em Bevilaqua (2005), em cada um dos pavimentos, já considerando o sistema de eixos do programa SCIA ENGINEER, empregado no presente trabalho, estão indicados na Tabela 8.

Tabela 8 - Deslocamentos máximos por pavimento.

PAVIMENTO	Ux (mm)	Uy (mm)	Uz (mm)
1° PAVIMENTO	5,29	6,88	2,18
2° PAVIMENTO	9,99	13,82	3,66
3° PAVIMENTO	16,88	20,39	4,58
4° PAVIMENTO	22,18	26,23	5,08
5° PAVIMENTO	26,75	31,15	5,30
6° PAVIMENTO	30,46	35,02	5,37
7° PAVIMENTO	33,30	37,83	5,39

Fonte: Adaptado de Bevilaqua (2005, p. 196).

6 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado o dimensionamento das duplas diagonais equivalentes e a modelagem da estrutura para análise numérica.

6.1 Diagonais equivalentes

Para fins comparativos, a relação entre o deslocamento lateral e a ação horizontal aplicada no painel cisalhante, é adotada de acordo com os resultados obtidos por Bevilaqua. Onde, aplicando uma força horizontal de 1kN no topo do painel obtém-se um deslocamento horizontal de 0,273 mm, apresentado anteriormente na Figura 22.

Conforme já mencionado, a aplicação do método de modelagem simplificado com duplas diagonais equivalentes requer a estimativa de uma área para cálculo da tensão axial nas diagonais. Assim, foi adotado uma seção com 50 mm de diâmetro, o que corresponde a uma área de 1963 mm². Deste modo, aplicando as Equações 8, 9 e 10 definidas no item 4.3, foi estabelecido o comportamento do material que representa a rigidez das placas de OSB no modelo de duplas diagonais, os quais foram relacionados na Tabela 9.

Tabela 9 - Modelos de dupla diagonais equivalentes.

σ (MPa)	ε (‰)	E (MPa)
1,45x10 ³	0,048	3,0x10 ⁷

Fonte: Autoria própria (2021).

Utiliza-se dois modelos distintos de dupla diagonais na modelagem estrutural, conforme apresentado no Quadro 9.

Quadro 9 - Modelos de dupla diagonais equivalentes.

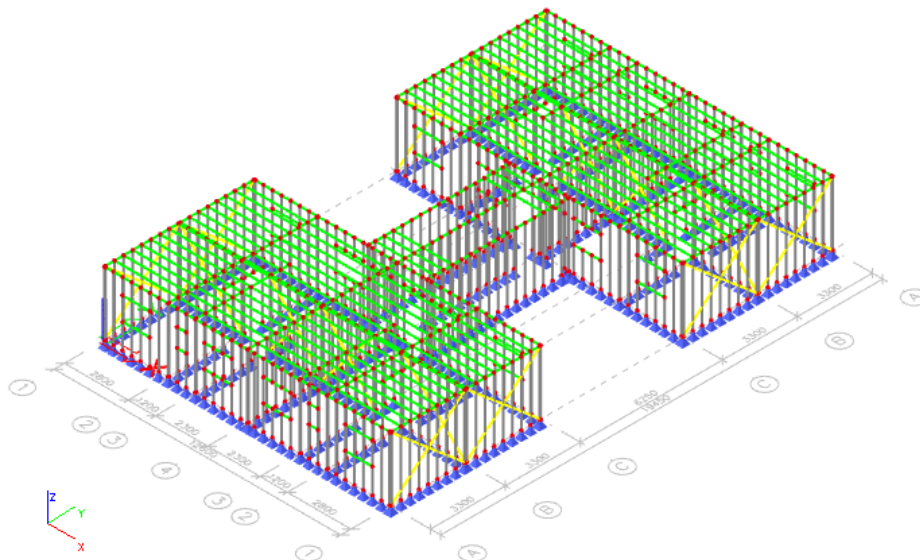
Modelo	Diâmetro (mm)
TIPO 1	50
TIPO 2	100

Fonte: Autoria própria (2021)

6.2 Modelagem da estrutura

Na modelagem da estrutura (Figura 24) foram considerados as vigas e os painéis de parede. Os painéis são formados basicamente por montantes, guias, contraventamentos e vergas, mas para sua modelagem numérica foi desconsiderado as guias, pois não contribuem para a resistência dos painéis. Para realizar tal análise foi utilizado o *software SCIA ENGINEER* versão educacional, considerando os efeitos de segunda ordem (P-Delta).

Figura 24 - Modelo unifilar do 1º pavimento edifício.



Fonte: Autoria própria (2021).

6.2.1 Montantes

O lançamento dos montantes foi realizado de acordo com a disposição apresentada no item 5.4.1, onde alguns pavimentos possuem a mesma configuração de posicionamento de montantes, conforme apresentado no Quadro 10.

Quadro 10 – Configurações para posicionamento dos montantes.

Pavimento	Posicionamento dos montantes
1º, 2º e 3º pavimento	C1
4º, 5º e 6º pavimento	C2
7º pavimento	C3

Fonte: Autoria própria (2021).

A configuração C1 diferencia-se da C2 apenas no Eixo 2, uma vez que no modelo C1 são utilizados 4 perfis Ue para os montantes de canto e 2 perfis Ue para os montantes intermediários, em C2 são 2 perfis Ue para os montantes de canto e 1 perfil Ue para os montantes intermediários. A configuração C3 utiliza somente 1 perfil Ue para montantes de canto e intermediário em todos os eixos e filas.

6.2.2 Vigas

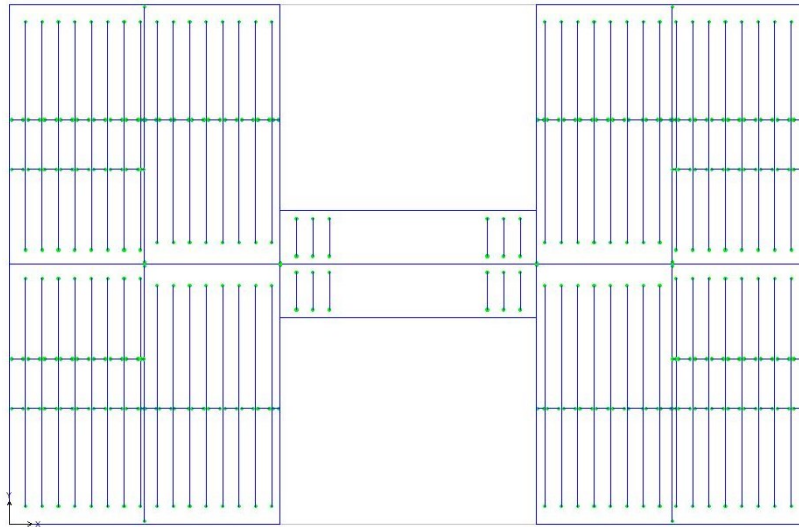
O lançamento das vigas ocorre selecionando a primeira e a última conectividade (nó do montante), visto que o programa detecta automaticamente os montantes intermediários. Os elementos em vermelho representam as vigas principais (Ue 140x40x12x0,95) e os em amarelo as intermediarias (Ue 140x40x12x0,80), conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Lançamento das vigas.



Fonte: Autoria própria (2021).

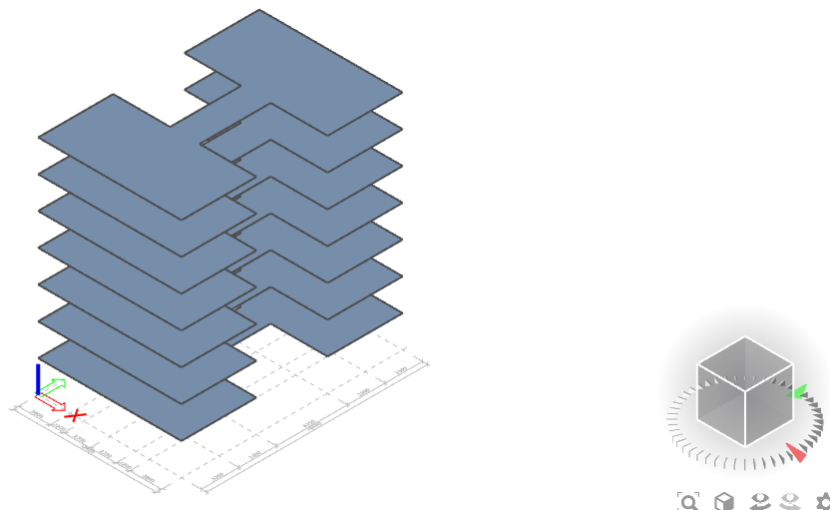
O modelo apresenta vigamento contínuo, onde as vigas foram interrompidas apenas nos limites entre as unidades, ou seja, no eixo de simetria do prédio. A Figura 26 ilustra a configuração das vigas nesse sistema, onde os pontos na cor verde representam os locais onde as vigas são interrompidas.

Figura 26 - Esquema estrutural para vigamento contínuo.

Fonte: Bevilaqua (2005, p. 150).

6.2.3 Pisos

Os pisos possuem a capacidade de restringir os deslocamentos das vigas de entrepiso no seu plano horizontal, fazendo com que tenham um movimento de corpo rígido no plano do piso. Para que isso ocorra foi utilizado elementos 2D com espessura de 10mm, conforme apresentado na Figura 27, com função de gerar o efeito de diafragma rígido na estrutura. Por fim, utiliza-se modificadores de propriedades 2D com objetivo de criar um elemento fictício, o qual possui 0,1% do seu peso próprio real.

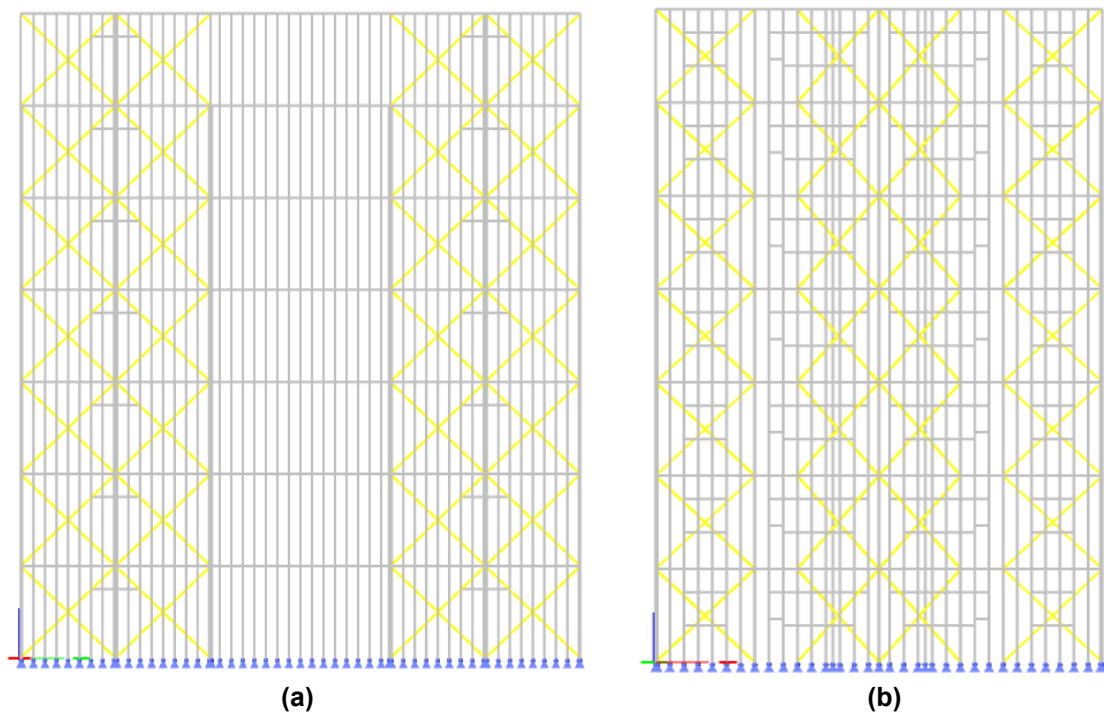
Figura 27 - Elementos 2D.

Fonte: Autoria própria (2021).

6.2.4 Contraventamento

Para considerar o efeito de diafragma vertical proporcionado pelo fechamento com placas de OSB, utiliza-se diagonais com 50mm (TIPO 1) e 100mm (TIPO 2) de diâmetro, conforme apresentado no Quadro 9. Esses elementos são lançados de forma análoga as vigas, indicando a primeira e a última conectividade. As diagonais possuem suas extremidades rotuladas, deste modo, ocorre apenas esforços axiais nos elementos. A Figura 28 (a) e (b) ilustram o posicionamento das diagonais nos eixos e filas.

Figura 28 - Posicionamento das diagonais equivalentes a) Eixo 1, (b) Fila B.

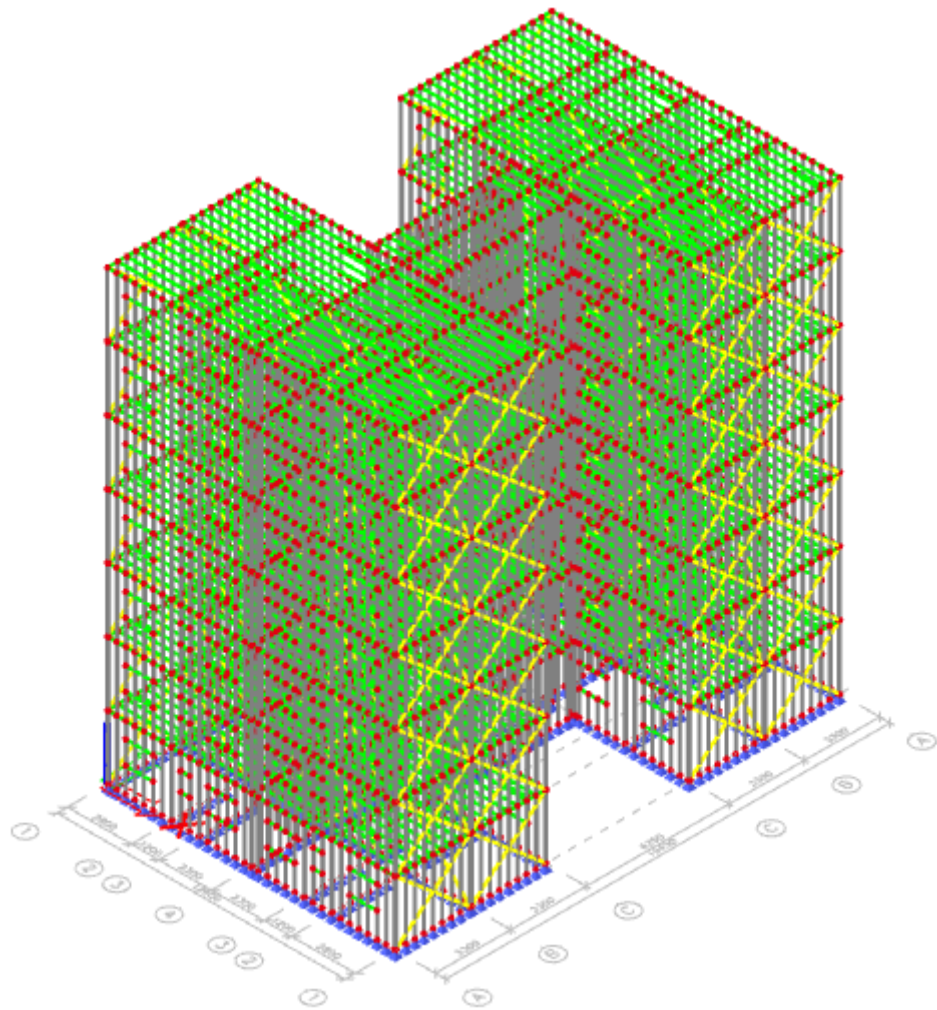


Fonte: Autoria própria (2021).

7 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são expostos os resultados obtidos na análise da estrutura (Figura 29) e o comparativo entre dois métodos de consideração dos painéis de cisalhamento.

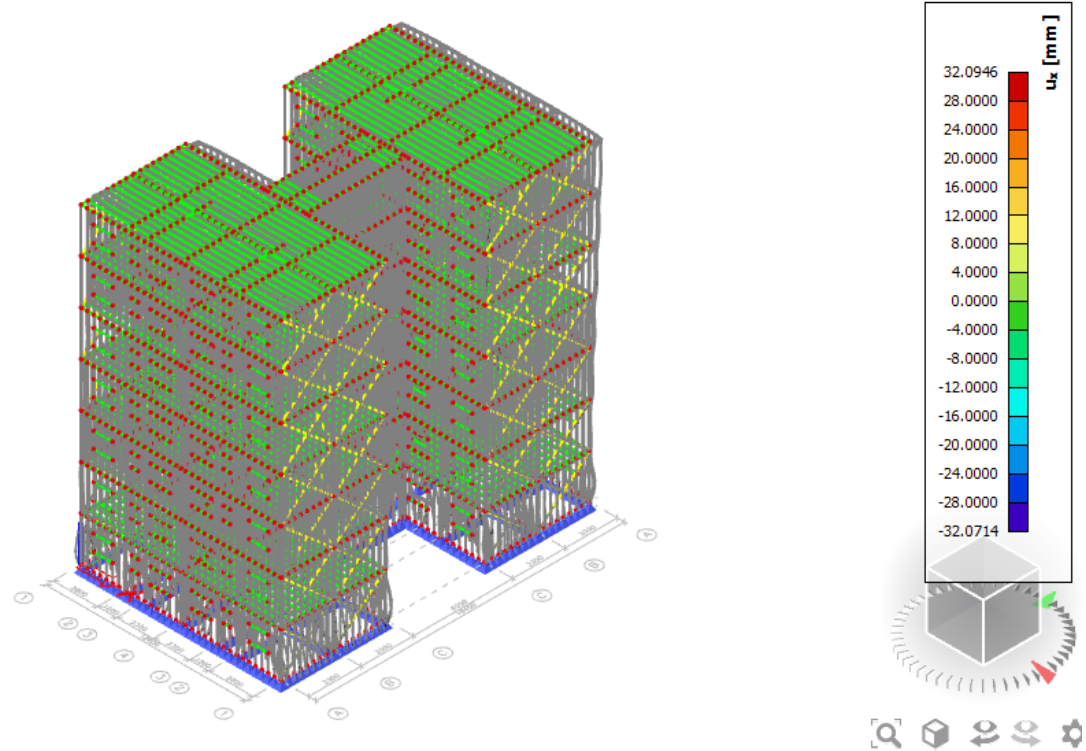
Figura 29 - Modelo unifilar do edifício.



Fonte: Autoria própria (2021).

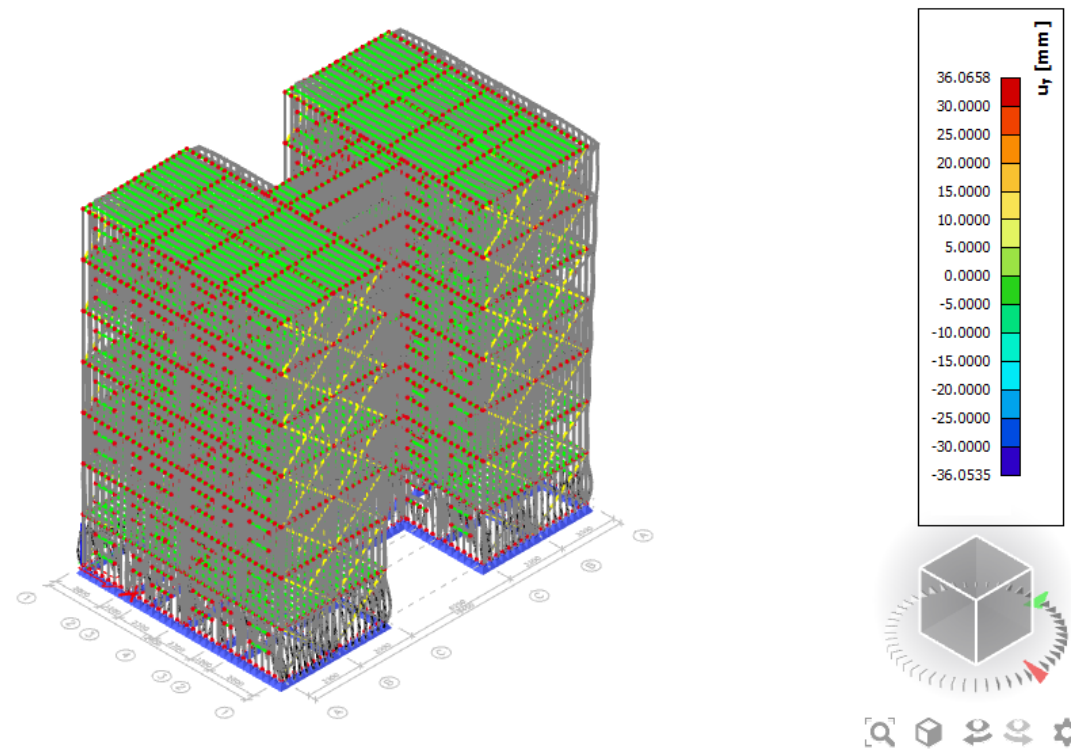
Os deslocamentos apresentados na Figura 30, 31 e 32, são oriundos da envoltória de combinações do estado limite de serviço.

Figura 30 – Deslocamento U_x (mm) da estrutura.



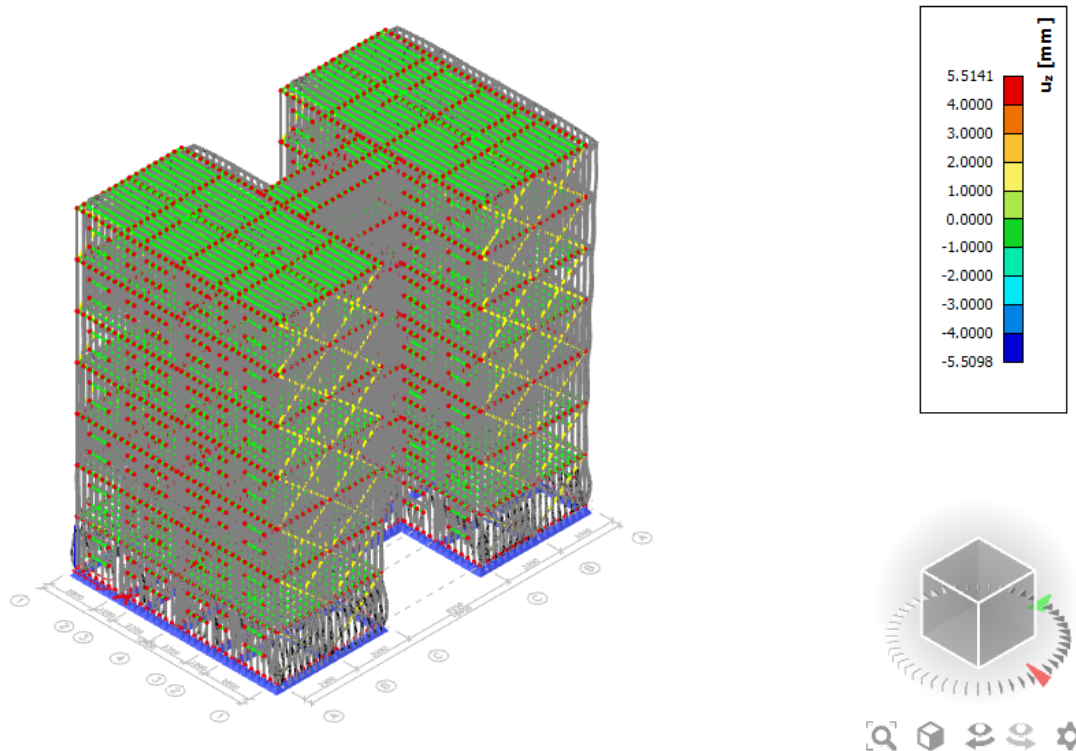
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 31 – Deslocamento U_y (mm) da estrutura



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 32 – Deslocamento U_z (mm) da estrutura



Fonte: Autoria própria (2021).

Os deslocamentos máximos obtidos na análise para cada pavimento são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Deslocamentos máximos por pavimento.

PAVIMENTO	U_x (mm)	U_y (mm)	U_z (mm)
1° PAVIMENTO	4,82	6,46	2,25
2° PAVIMENTO	9,28	12,62	3,65
3° PAVIMENTO	15,79	19,20	4,55
4° PAVIMENTO	21,01	24,87	5,12
5° PAVIMENTO	25,17	28,73	5,40
6° PAVIMENTO	28,89	32,85	5,48
7° PAVIMENTO	32,09	36,06	5,51

Fonte: Autoria própria (2021).

O deslocamento horizontal máximo permitido para o prédio, conforme Anexo A da ABNT NBR 14762:2010, é limitado a $H/400$ para o deslocamento do topo em

relação à base e $h/300$ para o deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos. Assim, para um edifício de 7 pavimentos, com pé-direito (h) de 2800mm e altura total (H) de 19600mm, tem-se:

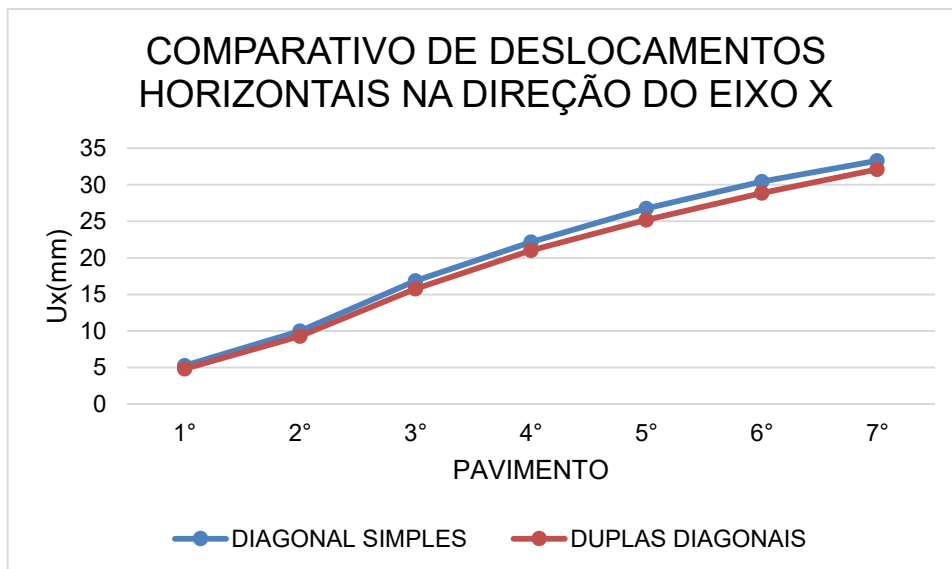
$$U_{total} \leq \frac{19600}{400} = 49mm \quad \text{Equação 11}$$

$$U_{entre\ pav} \leq \frac{2800}{300} = 9,33mm \quad \text{Equação 12}$$

O máximo deslocamento horizontal obtido no topo foi de 36,06mm, inferior ao limite de 49,00mm estabelecido na Equação 11. O máximo deslocamento horizontal entre dois pavimentos consecutivos foi de 5,88mm, que é inferior ao limite de 9,33mm estabelecido na Equação 12.

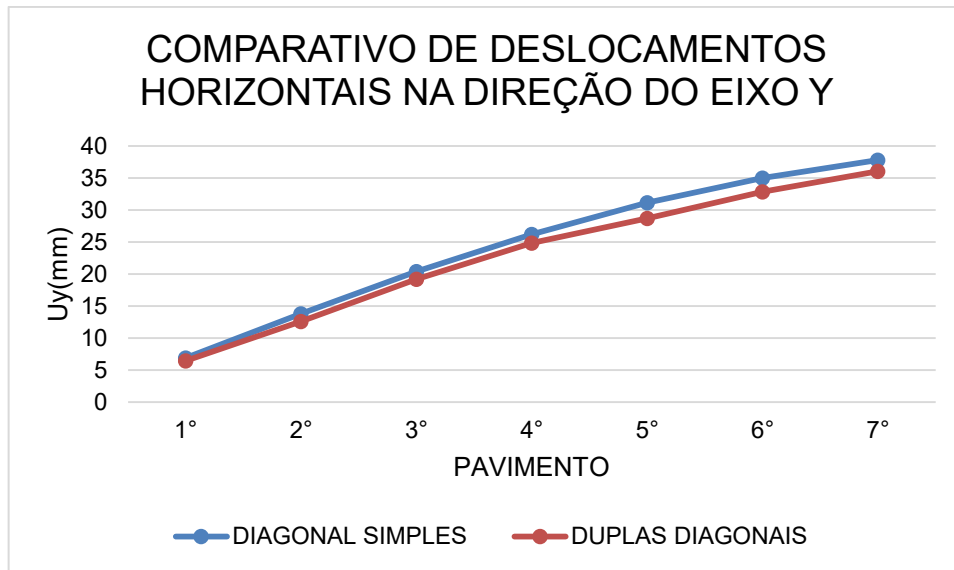
Comparando os deslocamentos obtidos no modelo proposto por Bevilaqua (2005), indicado anteriormente na Tabela 8, ao modelo de duplas diagonais (Tabela 10), obtém-se os gráficos da Figura 33, 34 e 35.

Figura 33 - Gráfico que relaciona os deslocamentos horizontais máximos na direção do eixo X.



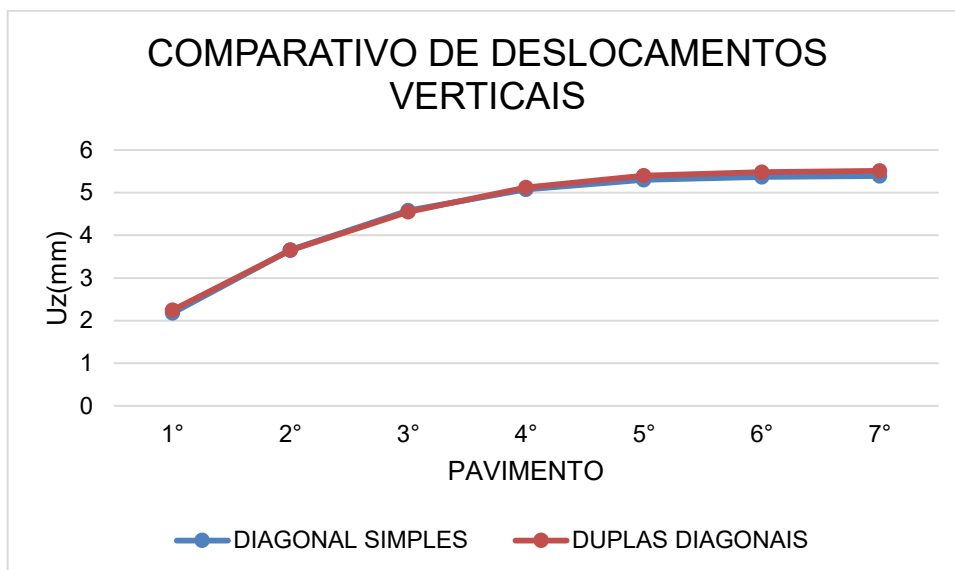
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 34 - Gráfico que relaciona os deslocamentos horizontais máximos na direção do eixo Y.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 35 - Gráfico que relaciona os deslocamentos verticais máximos.



Fonte: Autoria própria (2021).

Analisando-se o gráfico da Figura 33, verifica-se que os deslocamentos horizontais na direção do eixo X, onde tem-se placas de OSB nas duas faces dos painéis de parede, a diferença percentual máxima é de 9,0%. Nos deslocamentos verticais na direção do eixo Y (Figura 34), onde tem-se apenas placas de OSB em um dos lados dos painéis de parede a diferença percentual é de 8,7%. Para os deslocamentos verticais (Figura 35), a diferença percentual é de 3,1%. Vale salientar

que a diferença percentual dos deslocamentos encontrados para U_x , U_y e U_z no 7° pavimento são respectivamente 3,6%, 4,7% e 2,2%.

8 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi aplicado uma metodologia simplificada para consideração do confinamento que ocorre nos painéis de uma estrutura em *Light Steel Framing*, com o objetivo de comparar os deslocamentos da estrutura sob a ação de esforços solicitantes.

Quando comparado os resultados adquiridos via duplas diagonais equivalentes aos obtidos utilizando outro método, temos uma variação percentual média de 5,9% no deslocamento no eixo X, 6,2% para o deslocamento eixo Y e 1,9% para o deslocamento vertical. Com isso, o modelo simplificado de diagonais equivalentes se mostrou viável para aplicação no cálculo de estruturas de LSF por representar de maneira adequada o ganho de rigidez obtido pela consideração das placas de fechamento na resposta dos painéis de cisalhamento.

Deste modo, após a realização da modelagem numérica e análise dos dados obtidos, conclui-se que o procedimento de modelagem utilizado no presente trabalho se apresenta como uma alternativa prática e eficiente para caracterizar a contribuição das placas de fechamento, uma vez que modelos complexos se tornam pouco viáveis devido aos recursos computacionais necessários e ao tempo disponível dos projetistas.

Por último, ressalta-se que o modelo de duplas diagonais para representação da rigidez de painéis de cisalhamento na estrutura traz vantagem em relação ao modelo de diagonais simples, pois pode ser aplicado em casos de solicitações cíclicas, como na análise de sismos, por exemplo, além de casos em que a assimetria da estrutura possa gerar ações de compressão nas diagonais.

REFERÊNCIAS

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **AISI S213**: North American standard for cold-formed steel framing: lateral design. Washington, DC, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15253**: Perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis reticulados em edificações: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14762**: Projeto de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6023**: Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

BEVILAQUA, R. **Estudo comparativo do desempenho estrutural de prédios estruturados em perfis formados a frio segundo os sistemas aportificado e light steel framing**. 2005. 246 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

CARDOSO, A. C. S.; RODRIGUES, F. C.; CALDAS, R. B. Estabilização de sistemas estruturais em light steel frame com painéis de cisalhamento em OSB. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 22., 2016, Natal, RN. **Anais...** Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.

CONSULSTEEL. Consultores en Steel Framing. **Construcción con acero liviano**: Manual de procedimiento, Buenos Aires, 2002.

ESPAÇO SMART. **Economia de água com construção seca**. 2016. Disponível em: <<https://www.espacosmart.com.br/economia-de-agua-com-construcao-seca/>>. Acesso em: 14 jun. 2020.

GASPAR, A. P. **Construção de edifícios de habitação em light steel framing**. 2013. 151 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Faculdade de Comunicação, Arquitetura, Artes e Tecnologias da Informação, Porto, 2013.

LENG, J.; SCHAFER, B. W.; BUONOPANE, S. G. Seismic computational analysis of CFS-NEES building. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLDFORMED STEEL STRUCTURES, 21., 2012, St. Louis, MO. **Anais...** St. Louis: Missouri University of Science and Technology, 2012.

PEDROSA, N. H. **Estudo da resistência e rigidez lateral de painéis de cisalhamento do sistema construtivo light-steel framing**. 2015. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.

REGO, D. J. M. **Estruturas de edifícios em light steel framing**. 2012. 175 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012.

RODRIGUES, F. C. **Série manual da construção em aço – steel framing: engenharia**, IBS/CBCA, Rio de Janeiro, 2006.

SANTIAGO, A. K.; FREITAS, A. M. S.; CRASTO, R. C. M. **Steel framing: arquitetura**, CBCA, Rio de Janeiro, 2012. (Série Manual da Construção em Aço).

SCHARFF, R. **Residential steel framing handbook**. Ed. McGraw-Hill, New York, NY, 1996, 448 p., 21 cm. ISBN 978-0070572317.

SERRETTE, R.; CHAU, K. Estimating the response of cold-formed steel frame shear walls. **Specifications for the design of cold-formed steel structural members**, Washington, DC, RP03-7, Paper 98, 2003.

TIAN Y. S.; WANG, J.; LU, T. J. Racking strength and stiffness of cold-formed steel wall frames. **Journal of constructional steel research**, v. 60, n. 7, p. 1069-1093 jul. 2004.

VITOR, R. O. **Modelagem numérica de diagonais equivalentes em painéis de cisalhamento do sistema light steel framing**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012