

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO DIAFRAGMA HORIZONTAL E VERTICAL EM EDIFICAÇÕES UTILIZANDO O SISTEMA LIGHTWEIGHT WOOD-FRAME

Guilherme Graboski Silva de Castro (UEL) E-mail: guilherme.graboski@uel.br

Marcos Vinício de Camargo (UEL) E-mail: marcos.camargo@uel.br

Resumo: O anseio pela execução de construções de formas mais ágeis, canteiros de obras limpos e organizados, aliado com o comprometimento pela economia sustentável, fazem do sistema construtivo leve em madeira (lightweight wood-frame construction) uma alternativa para diminuir o déficit habitacional que existe no Brasil. Assim, para executar a construção de edificações em wood frame de maneira econômica e segura, é preciso entender o comportamento estrutural desse sistema construtivo frente as solicitações que ocorrem sobre a edificação. Como se trata de uma construção com perfis leves em madeira, os esforços de vento agem de forma mais significativa sobre a estrutura, se comparado com edificações mais convencionais em concreto armado, por exemplo. Portanto, o objetivo desse trabalho foi analisar o comportamento estrutural de edificações em wood frame devido as ações horizontais de ventos incidentes, sendo o efeito diafragma horizontal e vertical, o mecanismo responsável por realizar o contraventamento da estrutura. Desse modo, através de um modelo computacional desenvolvido no software SAP2000, aplicou-se as cargas de vento e foram modelados os diafragmas de piso e parede, com o intuito de analisar o comportamento do sistema de distribuição de cargas, bem como, comparar os resultados encontrados, com a teoria a respeito do tema, normas e trabalhos realizados com modelos experimentais no sistema construtivo em wood frame. Os resultados obtidos, demonstraram que apesar de se tratar de um sistema construtivo leve em madeira, as cargas de vento não impactaram de maneira significativa nos esforços axiais e cortantes absolutos na estrutura, devido a fatores relacionados a altura total e localização da edificação.

Palavras-chave: Wood frame, Análise Estrutural, Diafragma horizontal, Diafragma vertical, Esforço de vento.

ANALYSIS OF DIAPHRAGM AND SHEAR WALL BEHAVIOR IN LIGHTWEIGHT WOOD-FRAME BUILDINGS

Abstract: The desire to build buildings faster with clean and organized construction sites, combined with the necessity of sustainable economic practices, make the lightweight wood-frame construction system an attractive alternative to combat the housing deficit that exists in modern-day Brazil. To execute the construction of wood-frame buildings in a safe and economically viable manner, it is important to understand the structural behavior of this constructive system with regards to the parameters that a project demand. In comparison to conventional reinforced concrete construction, wood-frame construction experiences the impact of wind forces significantly more. Therefore, the objective of this work is to analyze the structural behavior of wood-frame buildings with respect to horizontal loads of wind; specifically, the horizontal and vertical diaphragm effect as the mechanism responsible for bracing the structure. Thus, using a computational model developed in the SAP2000 software, it was intended to apply wind loads and model diaphragm and shear wall, in order to analyze the behavior of the load path, as well as to compare the results found, with the theory about the theme, references and works carried out with experimental models in lightweight wood-frame. The results obtained showed that despite the fact that it is a lightweight wood-frame construction system, the wind loads did not significantly impact the absolute axial and shear forces on the structure, due to factors related to the total height and location of the building.

Keywords: Wood frame, Structural analysis, Diaphragm, Shear wall, Wind loads.

1. Introdução

No Brasil existe uma carência por soluções pré-fabricadas em madeira para edificações residenciais. Podemos citar vários fatores que influenciam esse cenário atual, como: características culturais da formação do povo brasileiro que privilegiam a utilização da alvenaria cerâmica, associação do uso da madeira com má qualidade e desconforto, ausência de incentivos econômicos para a viabilidade do sistema, pouca qualificação da mão-de-obra voltada para esse processo e priorização das universidades pelo ensino de matérias voltadas a utilização de concreto, alvenaria e estruturas com associação pilar-viga (SILVA, 2004).

O sistema construtivo em wood frame consiste na construção de edificações em até 5 pavimentos de forma industrializada e durável, com base na estruturação dos elementos construtivos horizontais e verticais por meio de perfis de madeira reflorestada e tratada, constituindo pisos, paredes e telhados através da combinação com outros materiais de acabamento e preenchimento que aumentam o conforto térmico e acústico, além de proteger contra agentes biológicos, umidade e o fogo (MOLINA; CALIL, 2010).

Com relação ao sistema estrutural, o seu comportamento perante a ações verticais ocorrem de forma semelhante ao sistema construtivo em concreto convencional, ou seja, a distribuição de carga ocorre devido a esforços internos de flexão, por meio de um sistema resistente de massa ativa. Já a respeito das ações horizontais, como o vento e as forças sísmicas, as cargas aplicadas sobre a estrutura são resistidas por elementos horizontais e verticais chamados de diafragmas, que são os responsáveis por transmitir os esforços laterais sobre a edificação até a sua fundação.

A falta de incentivo acadêmico e da indústria pela expansão desse sistema construtivo no Brasil, que é amplamente conhecido, estudado e difundido por diversos países desenvolvidos, acaba acarretando a falta de normas brasileiras e estudos em língua portuguesa a respeito do tema. Assim, surge a necessidade de estabelecer um campo de estudo sólido para que os profissionais e acadêmicos da construção civil possam se sentir incentivados e capacitados a entender o comportamento estrutural e os processos construtivos de um sistema pouco utilizado em cenário nacional.

2. Referencial teórico

O objetivo de um sistema estrutural em uma edificação é realizar a transferência dos esforços de maneira eficiente até a fundação, o que se entende por eficiente é a junção da economia de material utilizado, com a integridade física da estrutura. No sistema leve em madeira os elementos que compõem as paredes de vedação e separação dos ambientes, também possuem função estrutural, essa soma de funções gera vantagens frente a outros sistemas construtivos, sendo que esses elementos possuem pequenas dimensões e seções transversais simples (DIAS, 2005).

Por se tratar de um sistema estrutural mais complexo, pela quantidade e configuração entre os elementos, se comparado com outros sistemas construtivos convencionais em concreto armado, utilizados no Brasil, é necessário a aplicação de métodos de análise do comportamento estrutural para o melhor entendimento da distribuição de tensões proveniente das cargas horizontais e verticais que atingem a edificação, assim, suas conexões precisam ser devidamente projetadas e executadas para que a transferência de esforços ocorra sem ocasionar a aparição de patologias estruturais (DIAS, 2005).

Os tipos de cargas associadas a geração de ações verticais na estrutura em wood frame, são basicamente o peso próprio e as sobrecargas de utilização. Essas ações acontecem na estrutura geralmente através da aplicação de cargas distribuídas nos pisos e divisórias, iniciando seu ponto de aplicação nas chapas de fechamento em OSB (Oriented Strand Board) que realizam a distribuição e transferência das cargas atuantes no piso para os elementos de ossatura (joists), que em seguida descarregam nas paredes, gerando a compressão dos montantes.

As ações horizontais atuantes sobre a edificação podem ocorrer devido a ação do vento, forças sísmica, forças hidráulicas e empuxo do solo. Essas ações podem gerar momentos fletores, que são anulados pelas forças verticais como o peso próprio e os devidos dimensionamentos das conexões que irão transmitir esses esforços pela estrutura. Outro esforço que deve ser considerado na análise das ações horizontais é o cisalhamento, que em estruturas com sistema leve de madeira, acabam solicitando os contraventamentos de maneira mais intensa, sendo sua verificação, crucial para estabilidade sob o ponto de vista da translação, rotação e deformação da estrutura.

Os mecanismos de contraventamento responsáveis pela transferência dos esforços horizontais incidentes são os diafragmas, eles se dividem em horizontais e verticais, sendo o primeiro, o conjunto que envolve basicamente o piso, as vigas de ossatura e as ligações. Já com relação ao diafragma vertical, temos as paredes diafragmas, que tem como elementos os banzos superiores e inferiores da parede, os montantes, os painéis de fechamento e as ligações.

O caminho realizado pelas ações horizontais, principalmente de vento, tem seu início na região de contato com a superfície lateral das paredes transversais externas a edificação, em seguida, esses esforços são transmitidos para o diafragma horizontal e para a fundação (edificação térrea). Do diafragma de piso, os esforços são transmitidos para as paredes diafragmas por meio de um comportamento de viga apoiada. Por fim, os esforços do diafragma vertical chegam até a fundação através de um comportamento de viga engastada (SILVA, 2004).

Os diafragmas são componentes presentes em diversas estruturas e sistemas construtivos, podendo ser elementos horizontais ou verticais, rígidos, semi-rígidos, pseudo-flexíveis ou flexíveis. Esses elementos estruturais podem exercer como função a transferência de esforços cortantes e momentos torçores devido a aplicação de ações horizontais sobre a estrutura, sendo essa capacidade de distribuição, dependente da rigidez do diafragma. Outra função, especificamente para os diafragmas horizontais, está em fornecer um apoio aos elementos verticais da estrutura, restringindo o seu deslocamento local, além de realizar a distribuição das cargas verticais (ALEMDAR, B. N.; PATHAK R. apud LOPES, 2014).

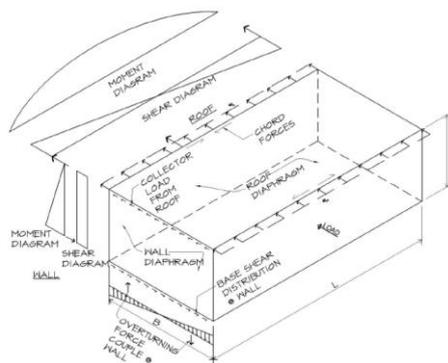


Figura 1 – Efeito diafragma (STUART, 2013)

Dentre as teorias de análise do comportamento estrutural de diafragmas de piso, temos a analogia de viga apoiada com seção transversal I, que parte da premissa de que os painéis de fechamento exercem a função semelhante à da “alma”, resistindo aos esforços cisalhantes no plano do piso. Já os banzos do perímetro por sua vez, exercem o comportamento semelhante ao da “mesa”, que é de resistir aos esforços normais a seção, além dos esforços axiais gerados pelo momento fletor (SANTOS, 2005).

O comportamento estrutural das paredes diafragmas podem ser entendidos através de uma analogia de viga em balanço, em que uma de suas extremidades está livre e a outra engastada, porém, devido ao seu comprimento ser relativamente maior que a altura de uma viga comum, os esforços cisalhantes atuam de maneira uniforme na base da parede, diferentemente de uma viga, em que os esforços cisalhantes se distribuem através de uma parábola onde no centro da seção as tensões são maiores. Por fim, ocorre que as forças de tração e compressão geradas pelas cargas laterais se concentrem nos montantes da extremidade (Design and Construction Guide, 2001 apud DIAS, 2005).

3. Metodologia

3.1 Modelagem e consideração das ações de vento

Como forma de analisar o comportamento dos diafragmas horizontais e verticais que compõem a estrutura de uma edificação em Wood Frame, foi utilizado como base, a arquitetura da edificação presente no trabalho de SALLES (2016), desenvolvido para o dimensionamento de uma edificação com estrutura em Light Steel Framing. Um trabalho mais recente MUNIZ (2018), foi desenvolvido para a elaboração de um projeto estrutural em Wood Frame, adotando a mesma arquitetura utilizada por SALLES (2016), se trata de uma edificação com 4 andares, 4 apartamentos por pavimento, pé direito de 3 metros, uma área de implantação de 296 m², possuindo dimensões totais de 23,15 metros de fachada, 12,76 metros de largura e altura de 16 metros

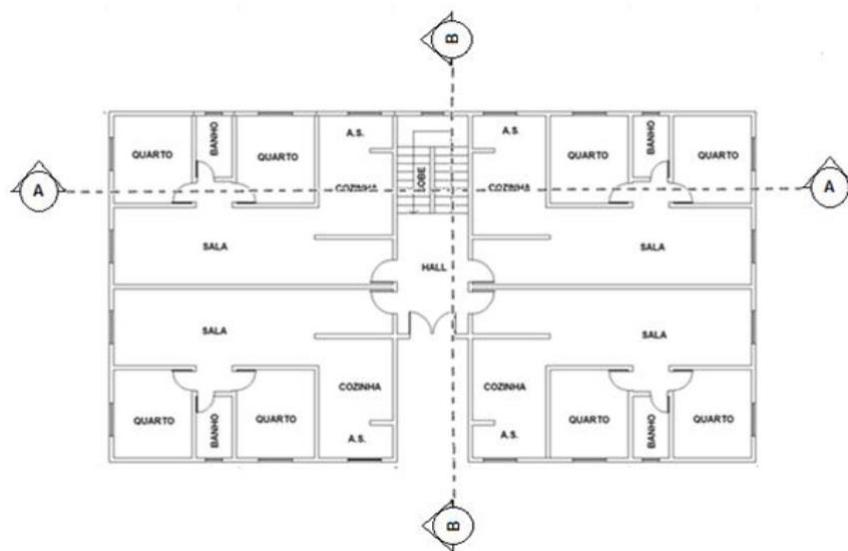


Figura 2 – Planta de arquitetura com eixos de corte (SALLES apud MUNIZ, 2018)

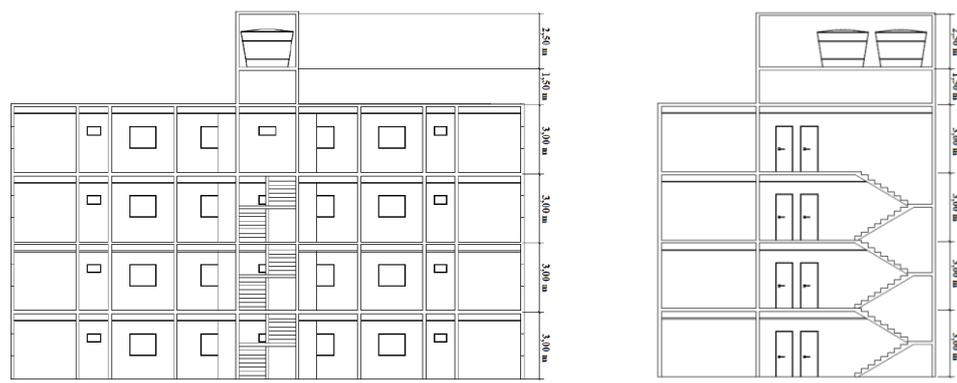


Figura 3 – Corte A-A e B-B (MUNIZ, 2018)

A edificação foi modelada através do software SAP2000, sendo considerados os esforços de carregamento permanente como: peso próprio das paredes estruturais e não estruturais, piso, telhado, escadas e caixa d'água. Além disso, foram consideradas as ações variáveis de carga acidental segundo a NBR 6120 (2019). O trabalho de MUNIZ (2018), não considerou o carregamento de vento na análise da combinação de esforços sobre a estrutura modelada, assim, como continuidade ao trabalho feito, foram realizadas as análises estruturais da edificação com relação aos esforços de vento, obtidos através da NBR 6123 (1988), bem como, a modelação e verificação do comportamento do sistema de contraventamento composto pelos diafragmas verticais e horizontais.

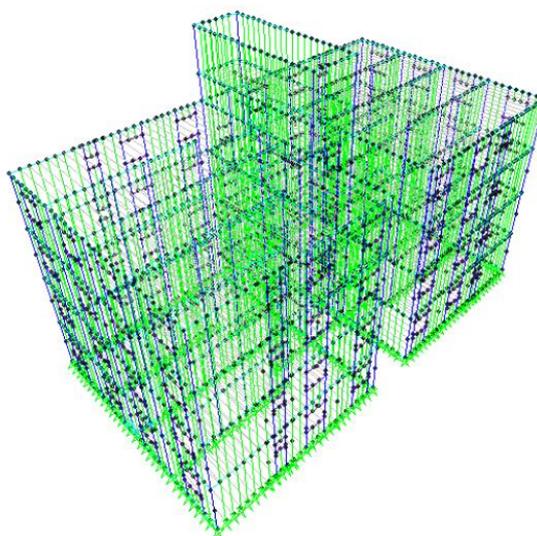


Figura 4 – Estrutura tridimensional (MUNIZ, 2018)

No modelo tridimensional desenvolvido, os diafragmas verticais e horizontais foram modelados baseado no artigo de COLLINS, M. et al. (2005), porém, com algumas simplificações. O diafragma de piso foi modelado considerando o conjunto entre as vigas de piso e as chapas de fechamento em OSB. Já com relação aos diafragmas de parede, foram detalhados os quadros estruturais como elementos de barra e para simular a rigidez da parede no seu plano aos esforços cisalhantes, foram utilizadas duas molas diagonais.

As molas foram aplicadas sobre elementos lineares com sua rigidez equivalente a um diafragma de parede, com as características construtivas estabelecidas no modelo. Devido a presença de aberturas nas paredes, como portas e janelas, adotou-se o método das paredes segmentadas (Segmented shear wall – SSW) para a modelagem das molas e análise do comportamento do diafragma de vertical, que parte de premissas mais conservadoras, desconsiderando os trechos de paredes que possuem aberturas.

Com relação as propriedades de resistência dos materiais constituintes da estrutura aos esforços atuantes na edificação, foi utilizada da análise linear na modelagem computacional, onde foi considerado o comportamento linear elástico da madeira, além disso, as ligações foram admitidas como sendo ideais.

A determinação das forças estáticas devidas ao vento, que incidirão sobre a edificação, foram feitos de acordo com a NBR 6123 (1988), considerando a edificação localizada na cidade de Londrina – PR. Assim, após a verificação da velocidade básica do vento através das isopleias e dos fatores S_1 , S_2 e S_3 , foram disposto os valores de velocidade característica (V_k) e pressão dinâmica do vento (q) através da Tabela 1, para a altura média de cada pavimento da edificação.

Tabela 1 – Velocidade característica e pressão dinâmica do vento

Pavimento	Z (m)	S_2	V_k (m/s)	q (kN/m ²)
Térreo	1,5	0,66	27,60	0,47
1º Pavimento	4,5	0,75	31,66	0,61
2º Pavimento	7,5	0,80	33,75	0,70
3º Pavimento	10,5	0,84	35,20	0,76
Caixa d'água	12,75	0,86	36,06	0,80
Cobertura	14,75	0,87	36,73	0,83

Na Tabela 2 foi disposta com os valores de força de arrasto em kN/m, incidentes na edificação para os ventos a 0° e 90° graus.

Tabela 2 – Força de arrasto em cada pavimento

Pavimento	Z (m)	Fa 0° (kN/m)	Fa 90° (kN/m)
Térreo	1,5	1,40	1,12
1º Pavimento	4,5	1,84	1,47
2º Pavimento	7,5	2,09	1,68
3º Pavimento	10,5	2,28	1,82
Caixa d'água	12,75	1,20	0,96
Cobertura	14,75	2,07	1,65

3.2 Combinações das ações do vento

As combinações de carregamento foram calculadas de acordo com a NBR 7190 (1988), de forma a estabelecer as ações incidentes sobre a edificação, ponderando a variabilidade e coeficiente de segurança para cada ação.

Para o Estado limite último, foi utilizada uma combinação última normal, de acordo com a Equação 1.

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{g_i} F_{g_i,k}) + \gamma_q \left(F_{Q_{1,k}} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} F_{Q_{j,k}} \right) \quad (\text{Equação 1})$$

A Equação 2 e 3 apresenta a consideração de combinações últimas normais, para a ação do vento a 0° e 90°, respectivamente, sendo o vento a ação variável secundária,

$$F_d = 1,4 \cdot P_{\text{próprio}} + 1,4 \cdot (C_{\text{acidental}} + V_{0^\circ} \cdot 0,5) \quad (\text{Equação 2})$$

$$F_d = 1,4 \cdot P_{\text{próprio}} + 1,4 \cdot (C_{\text{acidental}} + V_{90^\circ} \cdot 0,5) \quad (\text{Equação 3})$$

A Equação 4 e 5 apresenta a consideração de combinações últimas normais, para a ação do vento a 0° e 90°, respectivamente, sendo o vento a ação variável principal,

$$F_d = 1,4 \cdot P_{\text{próprio}} + 1,4 \cdot (V_{0^\circ} + C_{\text{acidental}} \cdot 0,4) \quad (\text{Equação 4})$$

$$F_d = 1,4 \cdot P_{\text{próprio}} + 1,4 \cdot (V_{90^\circ} + C_{\text{acidental}} \cdot 0,4) \quad (\text{Equação 5})$$

Segundo a NBR 7190 (1997), para as combinações de ações de longa duração onde o vento representa a ação variável principal, a solicitação de vento pode ser reduzida em 25%, porém, como o objetivo do trabalho é analisar mais detalhadamente essa variável, não foi aplicada a redução.

Para o Estado limite de serviço, seria utilizada uma combinação de curta duração, apresentada pela Equação 6. Porém, a parcela com relação ao vento é muito reduzida, pois o coeficiente de ponderação é igual a 0,2 para o caso de pressão dinâmica do vento, assim, como o propósito desse trabalho é analisar o esforço do vento sobre a edificação, não foi calculado e utilizado essa combinação de esforços.

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{g_i,k} + F_{Q_{1,k}} + \sum_{j=2}^n \psi_{1j} F_{Q_{j,k}} \quad (\text{Equação 6})$$

3.3 Considerações do efeito de parede diafragma

As paredes diafragmas foram modeladas por meio de molas, sendo essas, equivalentes a rigidez da parede aos esforços cortantes em seu plano. Assim, para se obter a capacidade unitária de rigidez da parede diafragma, foi utilizado das diretrizes apresentadas pela american wood council (AWC), no manual para especificações de projeto com relação ao vento e forças sísmicas (SDPWS).

Para a obtenção do valor nominal da capacidade aos esforços cortantes pela parede diafragma, foi utilizada a tabela apresentado pela american wood council (AWC) para paredes com revestimento em OSB, em que a partir das variáveis como a espessura da chapa de fechamento, mínima penetração das pregações no quadro estrutural, tipos de pregos e espaçamento entre as pregações nos perímetros do painel de fechamento, é possível obter o valor nominal da rigidez aos esforços cortantes do diafragma vertical.

Outro aspecto a ser verificado, são as relações entre a altura da parede (h) e o seu comprimento (bs). Para diafragmas verticais com fechamentos em OSB e que possuem bloqueadores, é permitido uma razão de no máximo 3,5:1 entre a altura e o comprimento, assim, as paredes que excederam esse valor, não foram consideradas como diafragmas, não estando presente na modelagem computacional.

Por fim, as paredes diafragmas com razão entre a altura (h) e o comprimento (bs), maior que 2, tiveram a capacidade unitária de rigidez ao esforço cortante de cálculo, multiplicada pelo fator WSP de acordo com a Equação 7,

$$WSP = 1,25 - 0,125 \cdot \frac{h}{b_s} \quad (\text{Equação 7})$$

As barras com propriedade de molas lineares foram modeladas nas regiões das paredes externas da edificação, como podemos observar pelas barras na cor laranja, presentes nas Figuras a seguir. De acordo com o método das paredes segmentadas (Segmented shear wall – SSW), foram desconsiderados os trechos com presença de aberturas, além disso, também foram desconsiderados os trechos de parede que não estão de acordo com as relações entre a altura da parede (h) e o seu comprimento (bs) e as regiões em que ocorrem a descontinuidade do diafragma de piso.

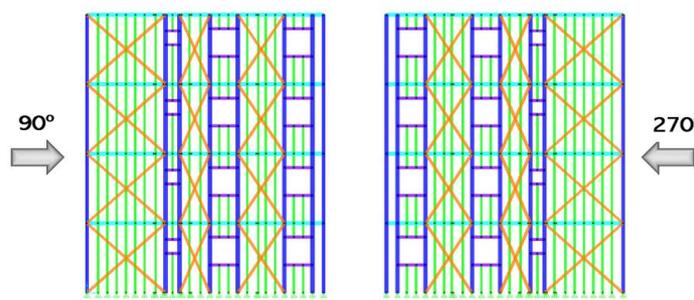


Figura 5 – Modelagem das molas na fachada com incidência de vento 0°

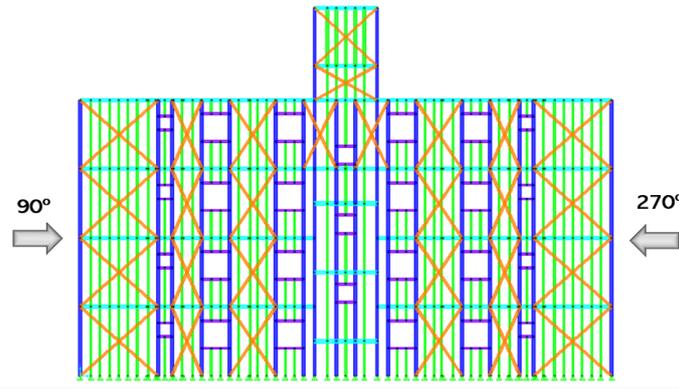


Figura 6 – Modelagem das molas na fachada com incidência de vento 180°

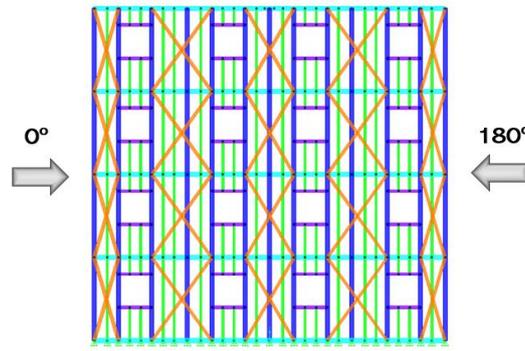


Figura 7 – Modelagem das molas nas fachadas com incidência de vento 90° e 270°

4. Resultados

4.1 Deslocamentos horizontais

A análise foi dividida em três casos, sendo que no primeiro, caso A, foram aplicados os esforços de vento sobre a edificação, porém, sem aplicar a propriedade do OSB no piso (shell) e a modelagem das molas como parede diafragma, no segundo caso, caso B, foram apenas aplicadas as propriedades do OSB no piso (shell), por fim, no terceiro caso, caso C, além de aplicar as propriedades do piso em OSB, foram modeladas as molas, realizando a função do diafragma vertical. Os três casos foram feitos considerando as combinações últimas normais, com o vento sendo a ação variável principal (P) e a ação variável secundária (S), para os ângulos de incidência de vento 0° e 90°.

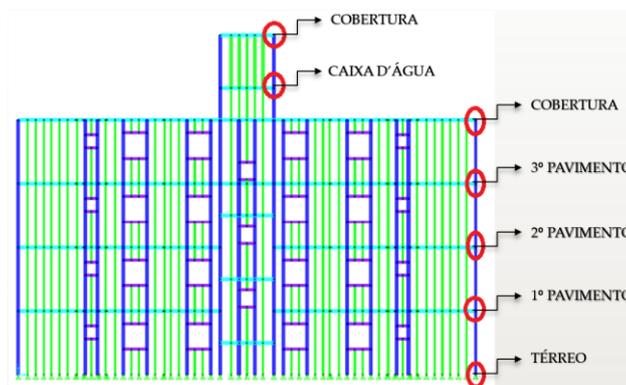


Figura 8 – Pontos de análise do deslocamento horizontal da edificação

Os resultados obtidos das três análises realizadas a respeito dos deslocamentos horizontais em centímetros da edificação nos pontos apresentados foram dispostos através da Tabela 3, 4 e 5, para os casos A, B e C, respectivamente. Foram obtidos os deslocamentos horizontais nas direções 1 e 2, sendo a direção 1, perpendicular a direção de incidência do vento a 0° e a direção 2, paralela à direção de incidência do vento a 0°. Com isso, foi possível analisar o comportamento da edificação com a aplicação em etapas dos graus de contraventamento e os efeitos de torção provocados pelo vento na edificação.

Tabela 3 – Deslocamentos horizontais, em centímetros, da edificação sem a modelagem dos diafragmas horizontais e verticais (Caso A)

Pavimento	h (m)	Vento 0° S		Vento 90° S		Vento 0° P		Vento 90° P	
		1	2	1	2	1	2	1	2
Térreo	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1º Pavimento	3,0	0,58	66,56	72,70	11,25	1,14	133,07	145,43	22,47
2º Pavimento	6,0	0,38	95,35	133,58	19,37	0,71	190,65	267,21	38,68
3º Pavimento	9,0	0,77	111,53	146,70	27,38	1,59	223,01	293,45	54,69
Cobertura	12,0	0,75	133,94	157,56	34,77	1,58	268,00	315,19	69,65
Caixa d'água	13,5	0,95	29,08	194,72	7,81	1,97	58,27	389,51	15,73
Cobertura	16,0	0,96	29,53	219,67	7,82	2,00	59,16	439,41	15,75

Tabela 4 – Deslocamentos horizontais, em centímetros, da edificação com a modelagem do diafragma horizontal (Caso B)

Pavimento	h (m)	Vento 0° S		Vento 90° S		Vento 0° P		Vento 90° P	
		1	2	1	2	1	2	1	2
Térreo	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1º Pavimento	3,0	0,48	1,22	0,08	21,00	0,90	2,44	0,10	42,02
2º Pavimento	6,0	0,82	2,46	1,04	35,99	1,56	4,89	2,16	71,95
3º Pavimento	9,0	0,83	3,40	1,93	46,74	1,60	6,65	3,93	93,34
Cobertura	12,0	0,88	20,15	12,57	50,82	1,64	47,98	25,27	109,31
Caixa d'água	13,5	0,88	20,83	32,50	2,11	1,63	49,35	65,13	3,46
Cobertura	16,0	0,86	21,30	46,03	3,27	1,61	50,27	92,19	1,12

Tabela 5 – Deslocamentos horizontais, em centímetros, da edificação com a modelagem dos diafragmas horizontais e verticais (Caso C)

Pavimento	h (m)	Vento 0° S		Vento 90° S		Vento 0° P		Vento 90° P	
		1	2	1	2	1	2	1	2
Térreo	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1º Pavimento	3,0	0,22	0,35	0,24	0,00	0,40	0,70	0,48	0,00
2º Pavimento	6,0	0,28	0,65	0,43	0,01	0,52	1,31	0,87	0,01
3º Pavimento	9,0	0,21	0,88	0,58	0,02	0,39	1,77	1,17	0,02
Cobertura	12,0	0,08	1,04	0,71	0,02	0,15	2,10	1,42	0,04
Caixa d'água	13,5	0,04	1,06	0,95	0,01	0,07	2,17	1,90	0,01
Cobertura	16,0	0,02	1,15	1,25	0,04	0,04	2,37	2,52	0,00

Como podemos observar, os deslocamentos foram significativamente maiores no caso A. No caso B, podemos perceber que a atribuição das características do OSB nas chapas de fechamento do piso, contribuíram para a redução dos deslocamentos para a maioria dos casos e direções do Vento, apenas nos casos de Vento 90° (S) e (P) na direção 2

houve o aumento do deslocamento em relação ao caso A, podendo ser explicado pela ocorrência de um efeito torçor na edificação, provocado pelo vento, devido a assimetria da edificação em uma de suas direções.

Por fim, no caso C, podemos verificar o ganho de rigidez estrutural da edificação devido a atribuição das características do OSB nas chapas de fechamento do piso, juntamente com a modelagem das molas lineares, assim, os valores dos deslocamentos obtidos foram significativamente menores que os encontrados nos casos anteriores. Outra relação que podemos constatar é que os deslocamentos foram maiores para os casos de Vento 0° e 90° (P) em comparação com os casos de Vento 0° e 90° (S), demonstrando a atuação direta do esforço lateral de vento, de acordo com sua intensidade, na estabilidade global da edificação.

4.2 Esforços

Foram feitas as análises com relação aos esforços axiais e cortantes nas direções 2-2 e 3-3, devido a aplicação das cargas de vento sobre a estrutura, considerando as combinações últimas normais, com o vento sendo a ação variável principal (P) e a ação variável secundária (S), para os ângulos de incidência de vento 0° e 90°.

Os esforços axiais ocorrem com maior intensidade nos montantes simples e duplas da edificação, aumentando de forma crescente da cobertura até o pavimento térreo devido aos esforços permanentes e as sobrecargas acidentais incidentes sobre os pisos dos pavimentos, além de possuírem maiores valores de compressão nas montantes centrais da edificação devido à presença da região da escadaria e da caixa d'água na cobertura. Os esforços de vento aplicados sobre as fachadas, são transferidos entre o diafragma de piso e a parede diafragma, o que acaba por gerar esforços de tração e compressão nos montantes da extremidade.

No trabalho realizado por MUNIZ (2018), com a mesma edificação, sem considerar os esforços de vento, a montante dupla mais solicitada para a combinação de esforços no estado limite último, considerando apenas cargas permanentes e sobrecarga, alcançou um valor de -77,94 kN. Para o presente trabalho, considerando a ação horizontal de vento, os esforços axiais máximos para as combinações de vento já apresentadas, foram dispostas através da Tabela 6.

Tabela 6 – Esforços axiais para as combinações de vento nos montantes duplos mais solicitados

Combinações	Nd (kN)
Vento 0° S	-80,92
Vento 90° S	-81,76
Vento 0° P	-65,50
Vento 90° P	-69,18

Podemos observar, que para o tipo de edificação estudada, com poucos andares, as ações horizontais de vento possuem uma relevância menor que as cargas gravitacionais na solicitação axial dos montantes, mesmo assim, acabou aumentando o esforço de compressão no montante dupla mais solicitada para o caso em que o vento é a ação

variável secundária (S), em comparação com a combinação que desconsidera o efeito do vento.

Os esforços cortantes 2-2 são maiores nos banzos das paredes posicionadas paralelamente a direção de incidência do vento, se comparado com os banzos das paredes transversais que recebem as cargas de vento, tanto para os ângulos de incidência de vento 0° e 90°. Outra questão que pode ser analisada, é que além da direção, a intensidade da ação do vento também tem influência direta nos esforços observados, sendo maiores os valores para as solicitações com combinações de vento como ação variável principal (P), se comparado com as solicitações provocadas pela combinação de vento como ação variável secundária (S), nos banzos das paredes posicionadas paralelamente a direção de incidência do vento.

Os esforços cortantes 3-3 são maiores nas regiões de abertura, vergas, contravergas e montantes das paredes posicionadas paralelamente a direção de incidência do vento, se comparado com as vergas, contravergas e montantes das paredes transversais que recebem as cargas de vento, tanto para os ângulos de incidência de vento 0° e 90°. Outra questão que pode ser analisada, é que além da direção, a intensidade da ação do vento também tem influência direta nos esforços observados, sendo maiores os valores para as solicitações com combinações de vento como ação variável principal (P), se comparado com as solicitações provocadas pela combinação de vento como ação variável secundária (S), nas vergas, contravergas e montantes das paredes posicionadas paralelamente a direção de incidência do vento.

5. Conclusões

Através das análises feitas para verificar o comportamento da edificação modelada em Wood-Frame, foi possível observar que os esforços de vento não foram significativos para a somatória dos esforços gerais presentes na estrutura, não alteraram de maneira considerável os valores máximos encontrados apenas com a aplicação das cargas permanentes e acidentais. Essa conclusão pode ser explicada devido à baixa altura da edificação, além de sua localização estar em uma região que não apresenta a recorrência de tempestades tropicais como, por exemplo, furações etc. Assim, bem como para estruturas projetadas em concreto armado convencional na região da cidade de Londrina, com alturas não significativas e poucos pavimentos, o vento também acaba não sendo levado em consideração na análise e dimensionamento.

Com relação aos deslocamentos horizontais, a estrutura apresentou um resultado satisfatório, mesmo sem possuir os parâmetros máximos admissíveis para realizar uma comparação mais apropriada dos valores, além do mais, não foram considerados a contribuição de outros materiais nos painéis de fechamento da parede diafragma, o que poderia contribuir ainda mais na análise para a redução dos deslocamentos horizontais.

O objetivo da análise teve como foco uma abordagem do comportamento global da edificação, incorporando no modelo computacional, os elementos das chapas de fechamento no diafragma de piso, bem como a modelagem das barras com propriedade de molas lineares para obtenção do comportamento da parede diafragma, porém, a análise individualizada dos diafragmas horizontais e verticais não foram realizadas por algumas limitações, sendo mais comumente verificadas em trabalhos em escala real, ou em softwares mais completos, que levam em conta uma série de variáveis com relação as especificações dos elementos estruturais.

Referências

- AWC. AMERICAN WOOD COUNCIL.** *Special Design Provisions for Wind & Seismic (SDPWS)*, American Wood Council, 2015.
- AWC. AMERICAN WOOD COUNCIL.** *Wood Frame Construction Manual (WFCM) for One- and Two-Family Dwellings*, American Wood Council, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro, nov. 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro, jun. 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 7190: Projeto de Estruturas de Madeira*. Rio de Janeiro, ago. 1997.
- COLLINS, M. et al.** *Three-Dimensional Model of Light Frame Wood Buildings*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/245305127_Three-Dimensional_Model_of_Light_Frame_Wood_Buildings_I_Model_Description. Acesso em: 04 aug. 2020.
- DIAS, Gustavo Lacerda.** *Estudo Experimental de Paredes Estruturais de Sistema Leve em Madeira (Sistema Plataforma) Submetidas a Força Horizontal no seu Plano*. 2005. Monografia (Doutor em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- LOPES, Lucas Augusto Milani.** *Análise de Estruturas de Cobertura de Galpões Logísticos Considerando a Atuação do Efeito Diafragma*. 2014. Monografia (Conclusão do Curso de Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina 2014.
- MOLINA, J. C.; CALIL, C.** *Sistema construtivo em wood frame para casas de madeira*. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 31, p. 143-156, jul/dez 2010.
- MUNIZ, Vinícius de Assis.** *Projeto Estrutural de um Edifício Residencial em Wood Frame*. 2018. Monografia (Conclusão do Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé 2018.
- SALLES, Aline Teixeira.** *Projeto Estrutural de um Edifício Residencial em Light Steel Framing*. 2016. Monografia (Conclusão do Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé 2016.
- SANTOS, Altevir Castro dos.** *Pisos em Sistema Leve de Madeira Sob Ação de Carregamento Monotônico em seu Plano*. 2005. Monografia (Doutor em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- SILVA, Anderson.** *Comportamento Diafragma de Paredes de Madeira no Sistema Leve Plataforma*. 2004. Monografia (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.
- STUART, M. D.;** *Flexible Metal Deck Roof Diaphragms*. PDHonline Course S184 (2 PDH). 2020.