



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA - CEUB
PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

CARLOS EDUARDO COSTA DE FARIA
LUCA GHISLENI FERREIRA

OTIMIZAÇÃO DO LANÇAMENTO ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO EM ESTRUTURA DE AÇO

BRASÍLIA

2021



CARLOS EDUARDO COSTA DE FARIA

LUCA GHISLENI FERREIRA

OTIMIZAÇÃO DO LANÇAMENTO ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO EM ESTRUTURA DE AÇO

Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica apresentado à Assessoria de Pós-Graduação e Pesquisa.

Orientação: Jocinez Nogueira Lima, MSc.

BRASÍLIA

2021

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha família, por sempre acreditarem no meu potencial.

A Greyce Fernandes, minha namorada, pelo amor, carinho e por estar sempre ao meu lado me dando forças para continuar.

Aos meus amigos, em especial Nestor Peres, André Fernandes e Jean Alves, pelo companheirismo.

A Pi Engenharia pelos ensinamentos e por disponibilizar as ferramentas computacionais utilizadas nesse trabalho.

Aos meus orientadores, Marco Bessa e Jocinez Nogueira, pela amizade, pelos sábios conselhos e pela imensa paciência ao me orientar nesse trabalho.

RESUMO

O trabalho teve como objetivo apresentar a melhor disposição dos elementos estruturais visando obter o modelo com menor consumo de aço. Variou-se o número de vigas secundárias presentes num piso. Cada modelo teve que atender os critérios de estabilidade global ($P-\Delta$), vibrações do piso, deslocamentos verticais e horizontais no topo do edifício e entre pavimentos. Utilizou-se da ferramenta computacional “TQS” para análise dos modelos. A concepção estrutural indicada é a de três vigas secundárias, sem escoramento e contraventamento em “K” com uma taxa de consumo de aço de aproximadamente 45,4 kg/m².

Palavras-chave: Concepção estrutural. Otimização estrutural. Estrutura mista aço-concreto.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 9 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 11 |
| 3 MÉTODO | 15 |
| 3.1 Normas utilizadas | 24 |
| 3.2 Dimensionamento estrutura mista aço-concreto | 24 |
| 3.3 Vibrações do piso | 24 |
| 3.4 Carregamentos gravitacionais | 24 |
| 3.5 Cargas de vento | 25 |
| 3.6 Escoramentos | 25 |
| 3.7 Análise de estabilidade global..... | 25 |
| 3.8 Combinações de cálculo..... | 26 |
| 3.9 Contraventamentos..... | 28 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 30 |
| 4.1 Análise da estabilidade global..... | 30 |
| 4.1.1 Coeficientes de arrasto..... | 30 |
| 4.1.2 Pilares e contraventamentos..... | 32 |
| 4.1.3 Estabilidade global..... | 33 |
| 4.1.4 Análise dos deslocamentos horizontais máximos | 42 |
| 4.3 Análise das frequências naturais | 44 |
| 4.4 Análise das taxas de aço..... | 45 |
| Nessa seção somente esses modelos nessa seção serão mostrados os consumos de aço em cada modelo analisado. | 45 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 46 |

1 INTRODUÇÃO

A racionalização construtiva cada vez mais empregada pela construção civil, no Brasil, visa sistemas construtivos tecnicamente mais avançados para diminuir custos.

Conforme demonstra a Figura 1, o consumo de materiais e insumos tem relevância significativa nos custos de uma estrutura metálica, fazendo com que a concepção estrutural seja uma das etapas mais relevantes do projeto estrutural (OLIVEIRA, 2018).

Figura 1- Custos de uma estrutura metálica.

| | |
|--------------------|-----------|
| Projeto estrutural | 1% a 3% |
| Detalhamento | 2% a 5% |
| Material e insumos | 20% a 50% |
| Fabricação | 20% a 40% |
| Limpeza e pintura | 10% a 30% |
| Transporte | 1% a 3% |

Fonte: BELLEI, ET. AL (2008)

É imprescindível analisar diversas alternativas para se definir a solução com o menor custo e o melhor desempenho (POLIZEL, 2018). A forma, a disposição das vigas, a distribuição dos pilares e a integração do aço com outros elementos colaboram na otimização do consumo de material (SÁLES, 1995).

A escassez de aço após a II Guerra Mundial levou os engenheiros europeus a considerarem a laje de concreto como componente de vigamento (PFEIL e PFEIL, 2016).

Atualmente, no Brasil, os sistemas mistos de aço/concreto são amplamente utilizados em edifícios com múltiplos pavimentos (VASCONCELLOS, 2006) e são considerados competitivos em relação aos sistemas tradicionais (CAMARGO, 2012). Algumas de suas vantagens são: execução rápida e limpa, menor espaço para estocagem de materiais em canteiros de obras, possibilidade de reaproveitamento de materiais, redução das proteções contra incêndio e corrosão, estruturas mais leves, fundações com solicitações menores e baixa variabilidade nas propriedades físicas – o que implica em uma baixa probabilidade de ruína dos elementos, portanto apresenta fatores de segurança reduzidos em relação a outros materiais (ALVA, 2000; MARTINS, PIMENTA e QUEIROZ, 2012; MARASCHIN, 2014).

Arquitetos e engenheiros recém-formados encontram dificuldade para conceber uma estrutura, pois essa etapa carece de uma maior sensibilidade e experiência do projetista. Nesse estágio devem ser previstas as ações que, no decorrer da vida útil da edificação, possam

ocasionar em prejuízos ao edifício e aos usuários. Apesar de existirem recomendações a serem seguidas, cada projeto guarda as suas particularidades; logo, deve-se explorar várias formas para que haja economia de materiais. (MARASCHIN,2014; POLIZEL, 2018)

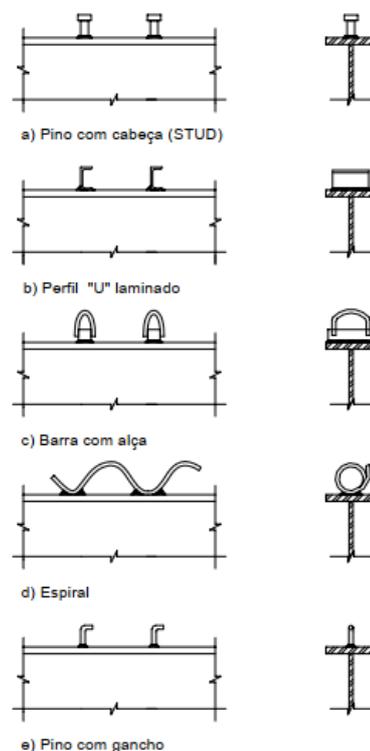
É comum ter bibliografias - no meio acadêmico - que analisam o comportamento de sistemas estruturais isoladamente, em contraposição, nos escritórios de projeto estrutural é de praxe analisar diferentes soluções estruturais para uma mesma edificação, porém os resultados são raramente publicados (OLIVEIRA, 2018).

Apesar da notável relevância acadêmica e profissional, bibliografias sobre concepção estrutural e comparações de diferentes sistemas para a mesma edificação são escassas. Diante disso, esse trabalho é justificado pela necessidade de suprir a carência de literatura sobre esses temas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apesar do acréscimo de resistência e rigidez proporcionados pela interação entre os elementos de aço e concreto (ALVA, 2000), esse foi usado a princípio como revestimento, protegendo os perfis metálicos contra incêndios e intempéries (VASCONCELLOS, 2006). Para que a seção de aço trabalhe com a laje de concreto é necessário a utilização de conectores de cisalhamento (PFEIL E PFEIL, 2016), a redução do peso das vigas metálicas compensam o aumento de custos gerados pela instalação desses dispositivos mecânicos (BELLEI et. al, 2008).

Figura 2- Tipos usuais de conectores.



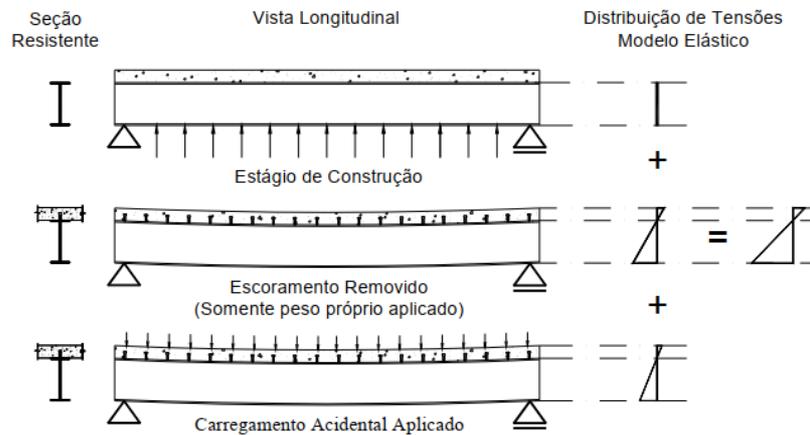
Fonte: ALVA (2000)

Um projeto estrutural visa o bom desempenho de seus elementos, evitando grandes deslocamentos, vibrações excessivas, danos locais e o colapso global da estrutura (PFEIL E PFEIL, 2016). A limitação das deformações visa adequar a estrutura a sua finalidade, evitar o acúmulo de água e impedir avarias a elementos não estruturais como alvenarias e acabamentos (FABRIZZI, 2007). Adotar o escoramento da laje, no período de construção, pode ser adequado para minimizar esses efeitos (VASCONCELLOS, 2006).

No dimensionamento de estruturas mistas o escoramento é um fator relevante, uma vez

que o concreto demanda de um período para alcançar a sua resistência de projeto e os esforços atuantes no decorrer desta fase podem ser distintas da situação definitiva (FABRIZZI, 2007). Nas vigas mistas construídas com escoramento, a seção de aço não é solicitada durante o endurecimento do concreto (PFEIL e PFEIL, 2016).

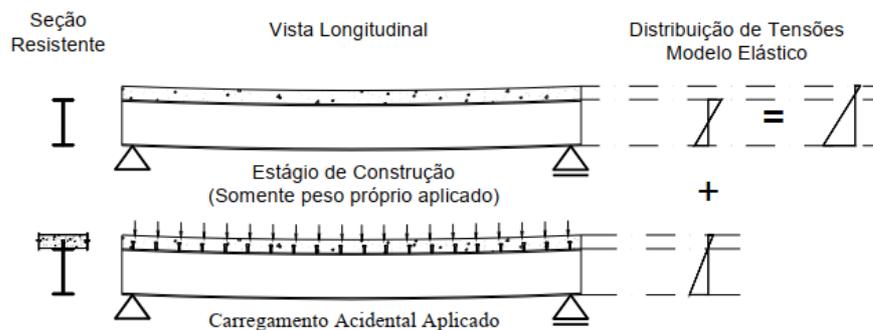
Figura 3- Vigas mistas escoradas.



Fonte: FABRIZZI (2007)

Em virtude da urgência na construção, pode-se adotar pelo não escoramento da laje (VASCONCELLOS, 2006), todavia, as vigas mistas devem ser dimensionadas para suportar todos as solicitações impostas antes da cura do concreto – já que nesse estágio o concreto e os conectores não são solicitados. Após o endurecimento do concreto, a sobrecarga será suportada pela seção mista, contudo, verifica-se uma sobreposição das tensões aplicadas antes e depois da cura do concreto. (FABRIZZI, 2007)

Figura 4-Vigas mistas não escoradas.



Fonte: FABRIZZI (2007)

Os vãos mais otimizados para pisos formados por vigas de aço são na ordem de 8 a 10 metros e o espaçamento entre pilares não deve ser inferior a 6 metros (SÁLES, 1995) Por conta disso, essa solução estrutural é tão utilizada em edifícios comerciais, onde são valorizados vãos livres e a flexibilidade de “layout” (FABRIZZI, 2007).

Camargo (2012) baseou-se no modelo proposto por Sáles (1995) e analisou seis diferentes soluções estruturais para um mesmo edifício, descritos na Tabela 1.

Tabela 1- Características dos modelos analisados.

| Características | Modelo 1A | Modelo 1B | Modelo 1C | Modelo 1D | Modelo 2 | Modelo 3 |
|--|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|--|
| Sistema estrutural | Aporticado | Aporticado | Aporticado | Aporticado | Híbrido | Híbrido |
| Elementos de estabilização | Pórticos em todas as direções | Pórticos contraventados em X nos eixos 1 e 6, e em K nas filas A e D | Pórticos contraventados em X nos eixos 1, 2, 5 e 6, e em K nas filas A e D |
| Tipo de bases | Engastadas | Engastadas | Engastadas | Engastadas | Engastadas | Engastadas |
| Redução da sobrecarga de utilização no dimensionamento dos pilares | Sim | Não | Não | Não | Sim | Sim |
| Altura dos perfis dos pilares | Variável | Variável | Variável | Variável | Constante | Constante |

Fonte: CAMARGO (2012)

Concluiu que o modelo 3 é o mais adequado, com um consumo aproximado de 56,09 kg/m².

Oliveira (2018) estudou um edifício possui quatro pavimentos, com pé direito igual a 3,325 m e dimensões em planta de 217,5 × 127,5 m. Comparou o dimensionamento de estruturas de metálicas e mistas de aço/concreto para um edifício garagem. Concebeu três modelos estruturais: o primeiro formado por pilares metálicos, vigas metálicas e lajes steel deck, o segundo e o terceiro são compostos por pilares mistos (revestidos no segundo e preenchidos no terceiro), vigas mistas e lajes steel deck. Obteve a melhor solução estrutural quando adotou vigas mistas e pilares mistos preenchidos. Observou uma redução no consumo de aço das estruturas mistas, quando comparadas ao sistema isolado, superior a 30%.

O contraventamento de edificações, normalmente, é realizado com o uso de subestruturas treliçadas em forma de diagonais, K ou X (MARASCHIN, 2014), essa parte do

sistema estrutural reduz os deslocamentos de pavimentos e o consumo de aço (SÁLES, 1995).

É comum observar em prédios comerciais o uso do sistema misto, composto por contraventamento em um dos sentidos, e aporticado no outro, uma vez que arquitetura interna do edifício impossibilita contraventar nos dois sentidos (BELLEI, 2008).

De acordo com a NBR 8800/2008, item 4.9.4, as estruturas são classificadas quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais da seguinte forma:

Tabela 2- Parâmetros de deslocabilidade segundo a NBR 8800/2008.

| Pequena deslocabilidade | Média deslocabilidade | Grande deslocabilidade |
|--------------------------------------|--|-----------------------------------|
| $\frac{\Delta_2}{\Delta_1} \leq 1,1$ | $1,1 < \frac{\Delta_2}{\Delta_1} \leq 1,4$ | $\frac{\Delta_2}{\Delta_1} > 1,4$ |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A NBR 8800/2008 - no item L.3.2 - estipula que a frequência natural de pisos em que as pessoas caminham regularmente deve ser superior a 4 Hz. A mesma norma propõe, na tabela C1, que o deslocamento de pisos não deve ser inferior a $L/350$, exceto quando há paredes de alvenaria sob as vigas do piso, nesse caso o deslocamento vertical não deve exceder 1,50 cm.

3 MÉTODO

O edifício hipotético a ser estudado será situado em Águas Claras (DF) e terá utilização comercial. A obra possui 10 pavimentos, constituídos por um andar térreo, oito pavimentos tipo e a cobertura, cada um com pé direito 3,00 m.

A estrutura tem dimensões, em planta, de 30m x 30m, com pilares espaçados a cada dez metros, resultado em quatro alinhamentos transversais e quatro longitudinais.

Na proposta inicial, foram propostos 36 modelos, porém no decorrer dos estudos observou-se na literatura que os modelos com vigas mistas são mais econômicos e nessa pesquisa serão utilizadas somente vigas desse tipo. Serão analisadas 24 concepções estruturais diferentes, variando o número de vigas secundárias, os contraventamentos, o sentido das vigas secundárias e a condição de construção escorada e não-escorada. A partir dos resultados, será realizada análises comparativas buscando encontrar o lançamento estrutural mais econômico

Os aços utilizados para as vigas, pilares e contraventamentos serão o ASTM A572 Grau 50.

Os conectores (stud-bolts) tem diâmetro 7/8", com $f_y = 415$ MPa;

O f_{ck} dos elementos de concreto será de 30 MPa, com granito como agregado graúdo, módulo de elasticidade inicial igual a 30672,46 MPa e secante de 26838,41 MPa.

As lajes maciças de concreto terão espessura de 15,0 cm.

Tabela 3 – Modelos analisados.

| Modelo | Nº vigas secundárias | Sentido vigas secundárias | Escoramento | Contraventamento |
|---------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------|-------------------------|
| 1 | 1 | PER | C | X |
| 2 | 3 | PER | C | X |
| 3 | 5 | PER | C | X |
| 4 | 1 | PER | S | X |
| 5 | 3 | PER | S | X |
| 6 | 5 | PER | S | X |
| 7 | 1 | PER | C | K |
| 8 | 3 | PER | C | K |
| 9 | 5 | PER | C | K |
| 10 | 1 | PER | S | K |
| 11 | 3 | PER | S | K |
| 12 | 5 | PER | S | K |
| 13 | 1 | PAR | C | X |
| 14 | 3 | PAR | C | X |
| 15 | 5 | PAR | C | X |
| 16 | 1 | PAR | S | X |
| 17 | 3 | PAR | S | X |
| 18 | 5 | PAR | S | X |
| 19 | 1 | PAR | C | K |
| 20 | 3 | PAR | C | K |
| 21 | 5 | PAR | C | K |
| 22 | 1 | PAR | S | K |
| 23 | 3 | PAR | S | K |
| 24 | 5 | PAR | S | K |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para fins didáticos, serão adotadas nomenclaturas para identificar cada modelo, onde:

PER: Perpendiculares ao eixo de maior inércia dos pilares;

PAR: Paralelo ao eixo de maior inércia dos pilares;

C: Com escoramento;

S: Sem escoramento;

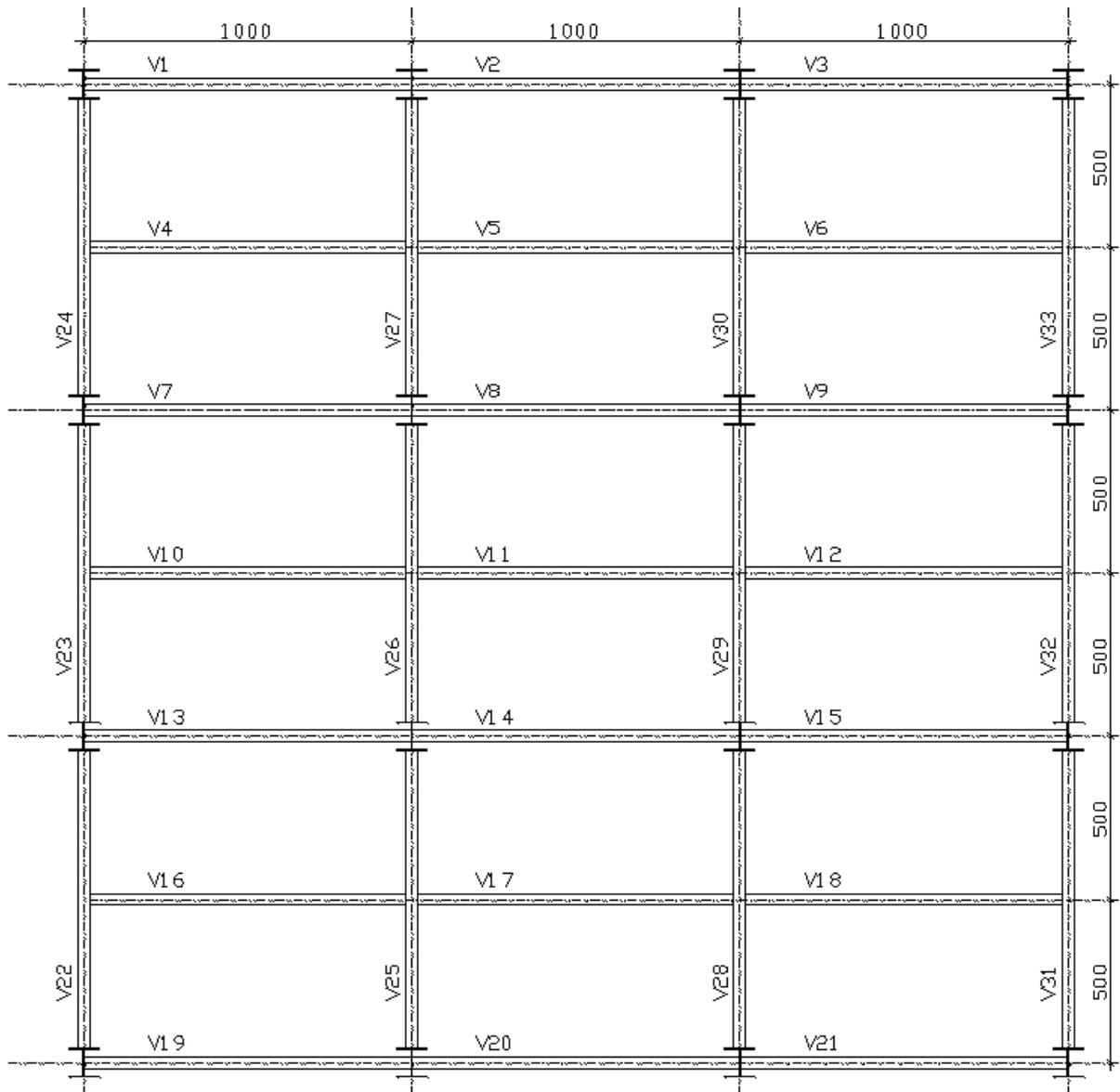
X: Contraventamento em "X";

K: Contraventamento em "K".

Exemplo:

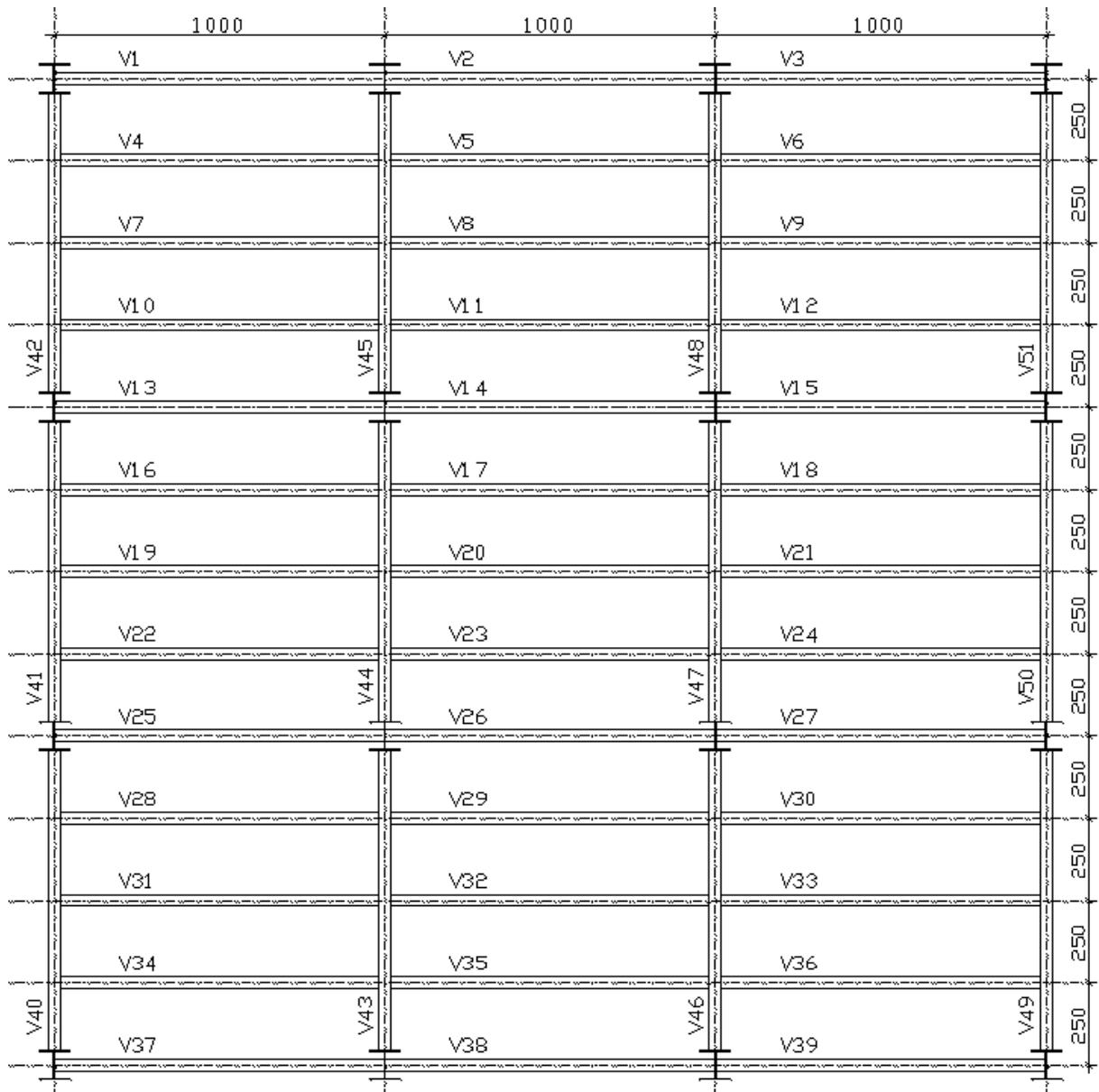
"MOD1_3VS-PER-C-X" é o equivalente a "modelo 1 com três vigas secundárias perpendiculares ao eixo de maior inércia dos pilares, com escoramento e com contraventamento em X".

Figura 5 - Modelos com uma viga secundária perpendicular a direção de maior inércia dos pilares.



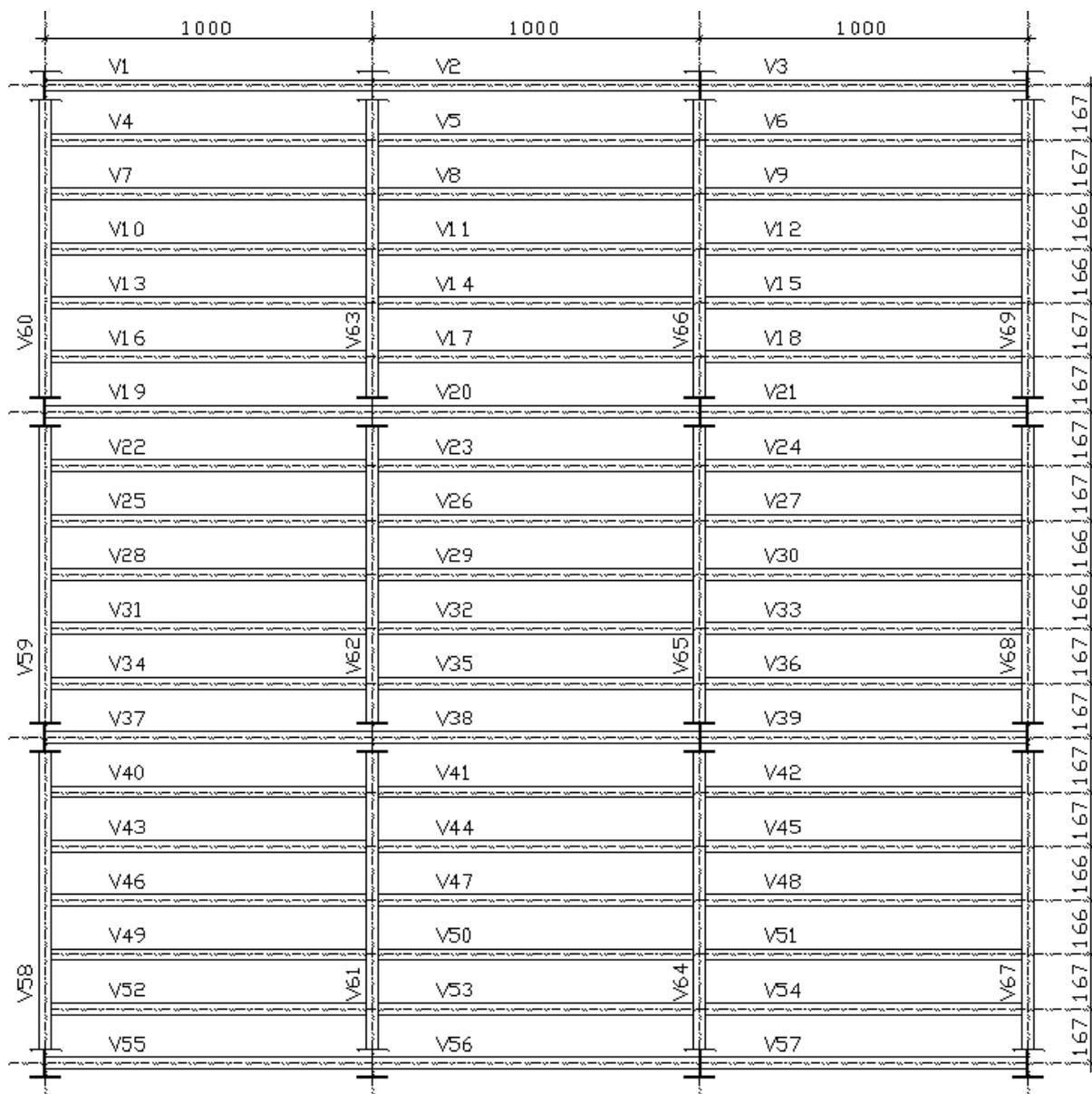
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6 - Modelos com três vigas secundárias perpendiculares a direção de maior inércia dos pilares.



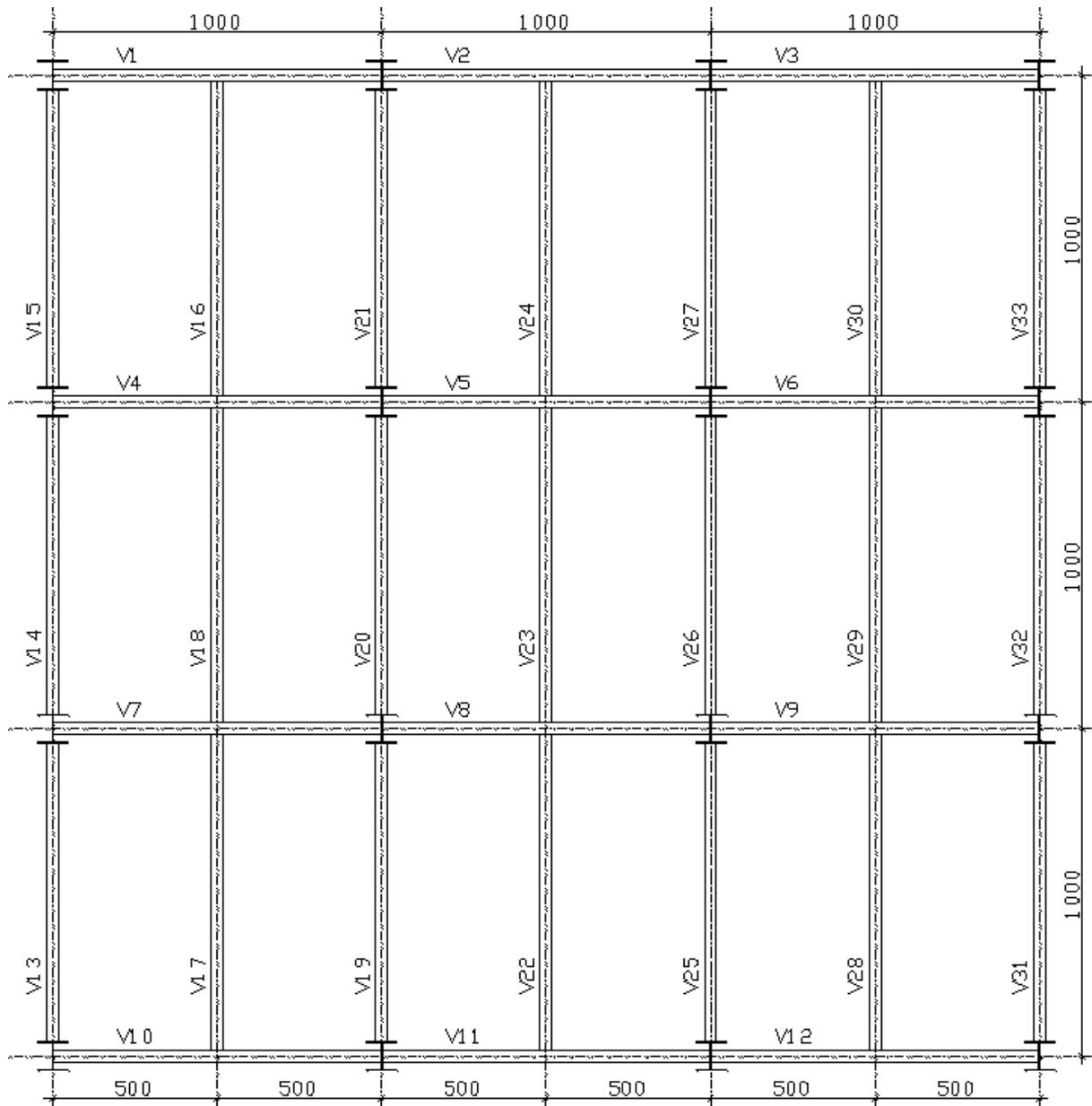
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7 - Modelos com cinco vigas secundárias perpendiculares a direção de maior inércia dos pilares.



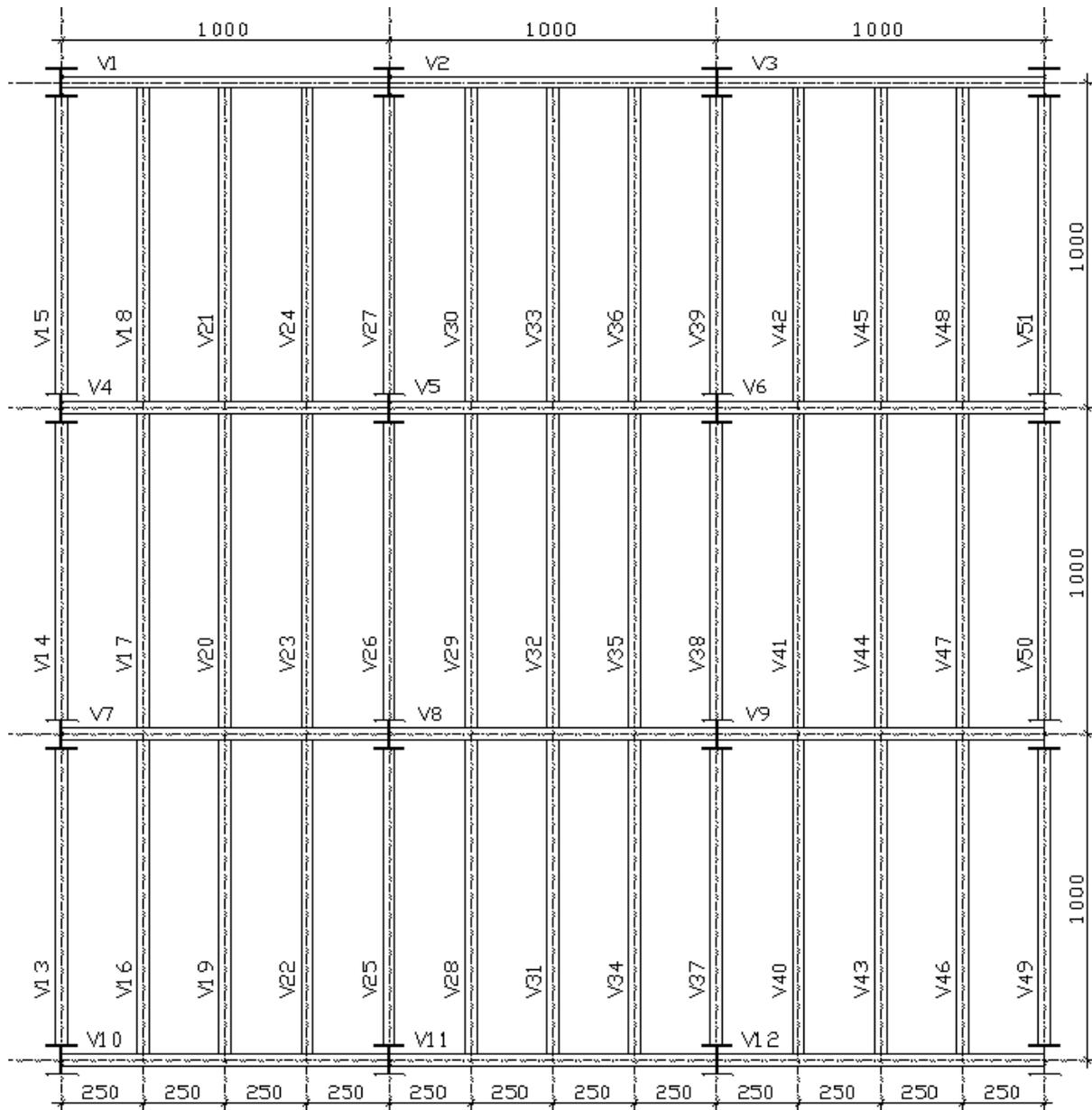
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 - Modelos com uma viga secundária paralela a direção de maior inércia dos pilares.



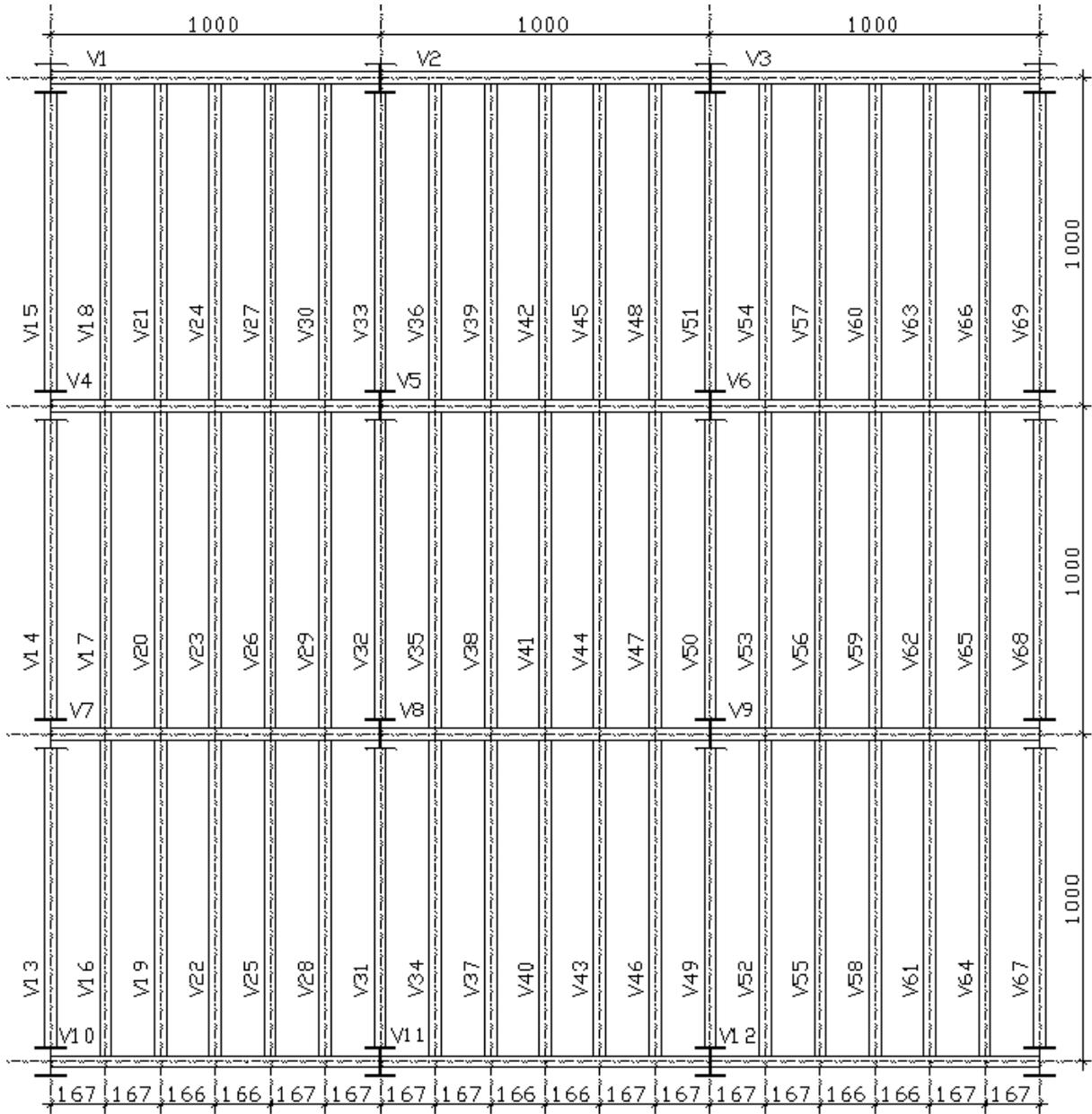
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 - Modelos com três vigas secundárias paralelas a direção de maior inércia dos pilares.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 - Modelos com cinco vigas secundárias paralelas a direção de maior inércia dos pilares.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Normas utilizadas

Os carregamentos a serem utilizados serão obtidos pela ABNT NBR 6120/2019, os esforços causados pela ação do vento serão determinados de acordo com a ABNT NBR 6123/1988 e as combinações de ações serão feitas conforme a ABNT NBR 8681/2003. Seus elementos serão dimensionados conforme os critérios explicitados nas normas ABNT NBR 8800/2008 e ABNT NBR 6118/2014.

3.2 Dimensionamento estrutura mista aço-concreto

A utilização de análises estruturais mais rigorosas é possibilitada pelo advento da capacidade computacional e softwares (CAMARGO, 2012), logo os edifícios - com lajes maciças, pilares metálicos e vigas mistas (na condição escorada durante a construção) - serão analisados e dimensionados com auxílio do software TQS.

Adotou-se como limite de deslocamento vertical de $L/350$ (2,86 cm) para as vigas que não recebem alvenaria e 1,00 cm para as vigas que recebem.

3.3 Vibrações do piso

Será considerada uma taxa de amortecimento igual a 0,006 e as frequências naturais do segundo modo de vibração superiores ao valor estabelecido na NBR8800/2008, que é de 4Hz.

3.4 Carregamentos gravitacionais

Todos os carregamentos foram considerados conforme estipula a NBR 6120/2019 na tabela 10. Por se tratar de um edifício comercial, adotou-se seguintes carregamentos no pavimento tipo:

- Permanente = 200 kgf/m²;
- Sobrecarga = 300 kgf/m²;
- Alvenaria de blocos cerâmicos de 14,0 cm com 2,0 cm de revestimento (peso específico de 1,90 tf/m³) em cada face e 2,20 m de altura (409 kgf/m).

Optou-se por adotar um carregamento menor no pavimento da cobertura:

- Permanente = 150 kgf/m²;
- Sobrecarga = 100 kgf/m²;

- Alvenaria de blocos cerâmicos de 14,0 cm com 2,0 cm de revestimento (peso específico de 1,90 tf/m³) em cada face e 1,50 m de altura (279 kgf/m).

Para dimensionar realizar o dimensionamento dos pilares, adotou-se uma redução de sobrecarga conforme propõe NBR6120/2019.

Considerou-se que as ligações correspondem a 8% do peso total da estrutura.

3.5 Cargas de vento

As forças devidas à ação estática do vento foram estabelecidas para as duas direções do edifício conforme a ABNT NBR 6123/1988. A velocidade básica do vento foi retirada do gráfico das isopletas da velocidade básica apresentado na norma. Para a cidade de Águas Claras (DF), local em que o edifício base está situado, $V_0 = 35$ m/s. Para a determinação do fator topográfico S_1 , foi considerado terreno plano ou fracamente acidentado. Para o fator S_2 , foi admitido a rugosidade do terreno na Categoria IV (Terrenos com obstáculos numerosos e pouco espaçados. Zona florestal, industrial, urbanizada, parques e subúrbios densos) e classe da edificação B (Maior dimensão horizontal ou vertical entre 20 e 50 m). Para o fator estatístico S_3 , a edificação foi enquadrada no Grupo 2 (Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação).

Tabela 4- Parâmetros do vento.

| Parâmetros do vento | |
|---------------------------------|----------|
| V_0 - Velocidade básica | 35,0 m/s |
| S_1 - Fator do terreno | 1,0 |
| S_2 - Categoria de rugosidade | IV |
| S_2 - Classe da edificação | B |
| S_3 - Fator estatístico | 1,0 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 Escoramentos

Adotou-se a distância de 1,50 m entre escoras.

3.7 Análise de estabilidade global

Serão estudados sistemas mistos de contraventamento, ou seja, composto por

contraventamento em “X” em um dos sentidos, e aporticado no outro. Essas subestruturas visam enrijecer a estrutura e deixá-la menos suscetíveis a deslocamentos horizontais.

A análise estrutural de segunda ordem pode ser feita por qualquer método que considere os efeitos local $N-\delta$ e global $P-\Delta$ (FAKURY et. al., 2016). Por estar presente em programas comerciais e por não apresentar duplicidade de análises, o emprego do método $P-\Delta$ (CAMARGO E SÁLES, 2019) foi adotado no estudo em questão.

Conforme estipula a norma ABNT NBR 8800/2008, considerou-se $H/400$ (7,50 cm) como limite de deslocamento horizontal máximo e $h/500$ (0,60 cm) como deslocamento máximo entre pisos, onde “H” é a altura total do edifício e “h” é o pé direito de cada pavimento.

Buscou-se trabalhar com estruturas de pequena deslocabilidade, ou seja, inferiores a 1,10.

3.8 Combinações de cálculo

Adotou-se os ponderadores de combinação de cargas estipulado na NBR 8681/2003.

Figura 11- Valores dos fatores de combinação (ψ_0) e de redução (ψ_1 e ψ_2) para ações variáveis

| Ações | ψ_0 | ψ_1 | ψ_2 ^{3), 4)} |
|--|----------|----------|----------------------------|
| Cargas acidentais de edifícios | | | |
| Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ¹⁾ | 0,5 | 0,4 | 0,3 |
| Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ²⁾ | 0,7 | 0,6 | 0,4 |
| Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens | 0,8 | 0,7 | 0,6 |
| Vento | | | |
| Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral | 0,6 | 0,3 | 0 |
| Temperatura | | | |
| Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local | 0,6 | 0,5 | 0,3 |
| Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos | | | |
| Passarelas de pedestres | 0,6 | 0,4 | 0,3 |
| Pontes rodoviárias | 0,7 | 0,5 | 0,3 |
| Pontes ferroviárias não especializadas | 0,8 | 0,7 | 0,5 |
| Pontes ferroviárias especializadas | 1,0 | 1,0 | 0,6 |
| Vigas de rolamentos de pontes rolantes | 1,0 | 0,8 | 0,5 |
| ¹⁾ Edificações residenciais, de acesso restrito. ²⁾ Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público. ³⁾ Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para ψ_2 o valor zero. ⁴⁾ Para combinações excepcionais onde a ação principal for o fogo, o fator de redução ψ_2 pode ser reduzido, multiplicando-o por 0,7. | | | |

Fonte: NBR 8681/2003.

Tabela 5- Combinações de ações de cálculo.

| N° combinação | Nome combinação | Coeficientes de ponderação de cargas | | | | | | |
|---------------|--------------------------------|--------------------------------------|-------------|------------|----------|-----------|------------|------------|
| | | Peso próprio | Permanentes | Acidentais | Vento 0° | Vento 90° | Vento 180° | Vento 270° |
| 1 | PP + PERM + ACID + 0,6°VENTO 1 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | | 0,60 | | |
| 2 | PP + PERM + ACID + 0,6°VENTO 2 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | | | | 0,60 |
| 3 | PP + PERM + ACID + 0,6°VENTO 3 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 0,60 | | | |
| 4 | PP + PERM + ACID + 0,6°VENTO 4 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | | | 0,60 | |
| 5 | PP + PERM + 0,7°ACID + VENTO 1 | 1,40 | 1,40 | 0,98 | | 1,00 | | |
| 6 | PP + PERM + 0,7°ACID + VENTO 2 | 1,40 | 1,40 | 0,98 | | | | 1,00 |
| 7 | PP + PERM + 0,7°ACID + VENTO 3 | 1,40 | 1,40 | 0,98 | 1,00 | | | |
| 8 | PP + PERM + 0,7°ACID + VENTO 4 | 1,40 | 1,40 | 0,98 | | | 1,00 | |

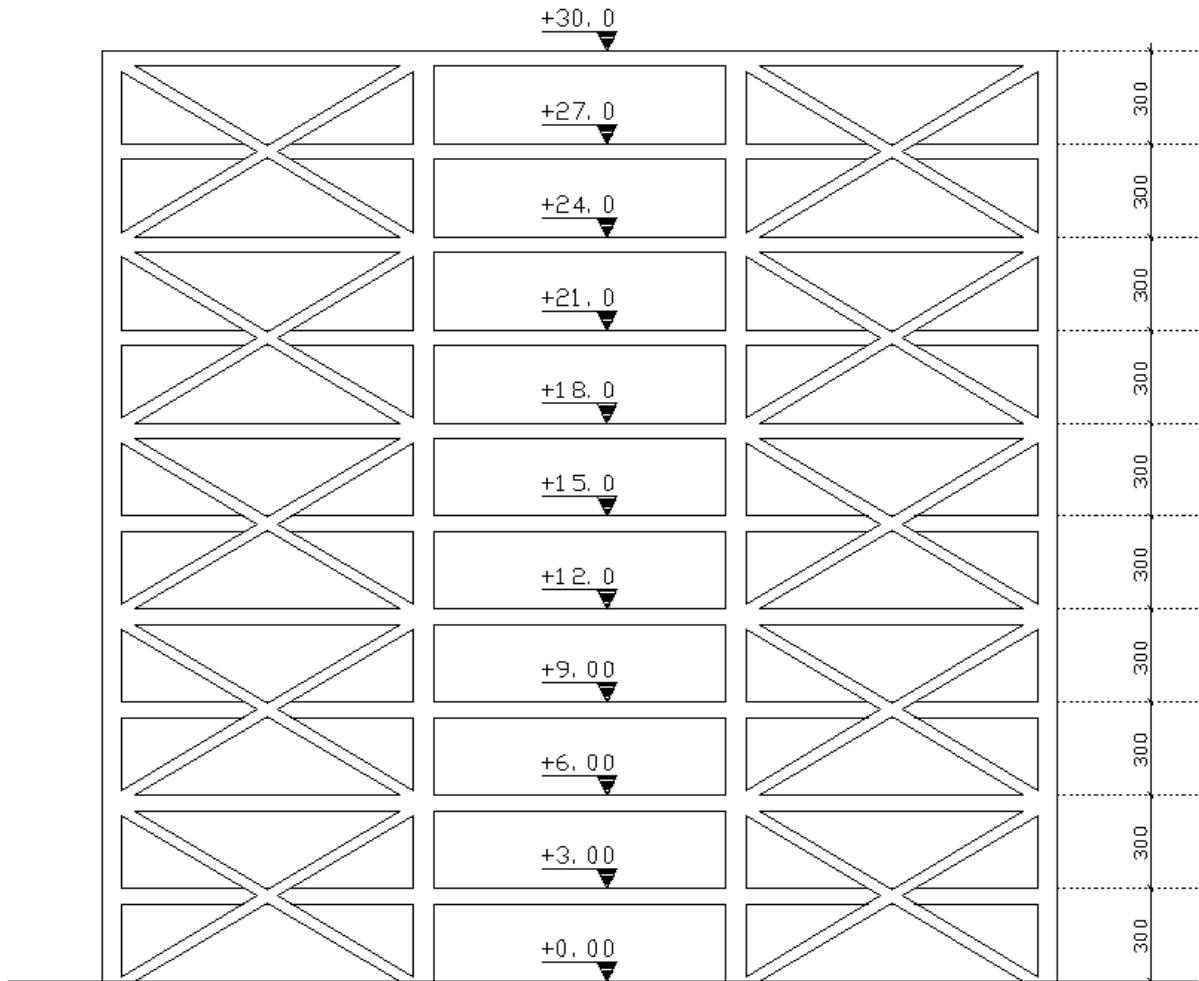
Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram utilizadas as combinações de carga mostradas na tabela acima. Além disso, usou-se $\delta_{f3} = 1,10$, conforme item 4.9.6.5 da NBR 8800/2008.

3.9 Contraventamentos

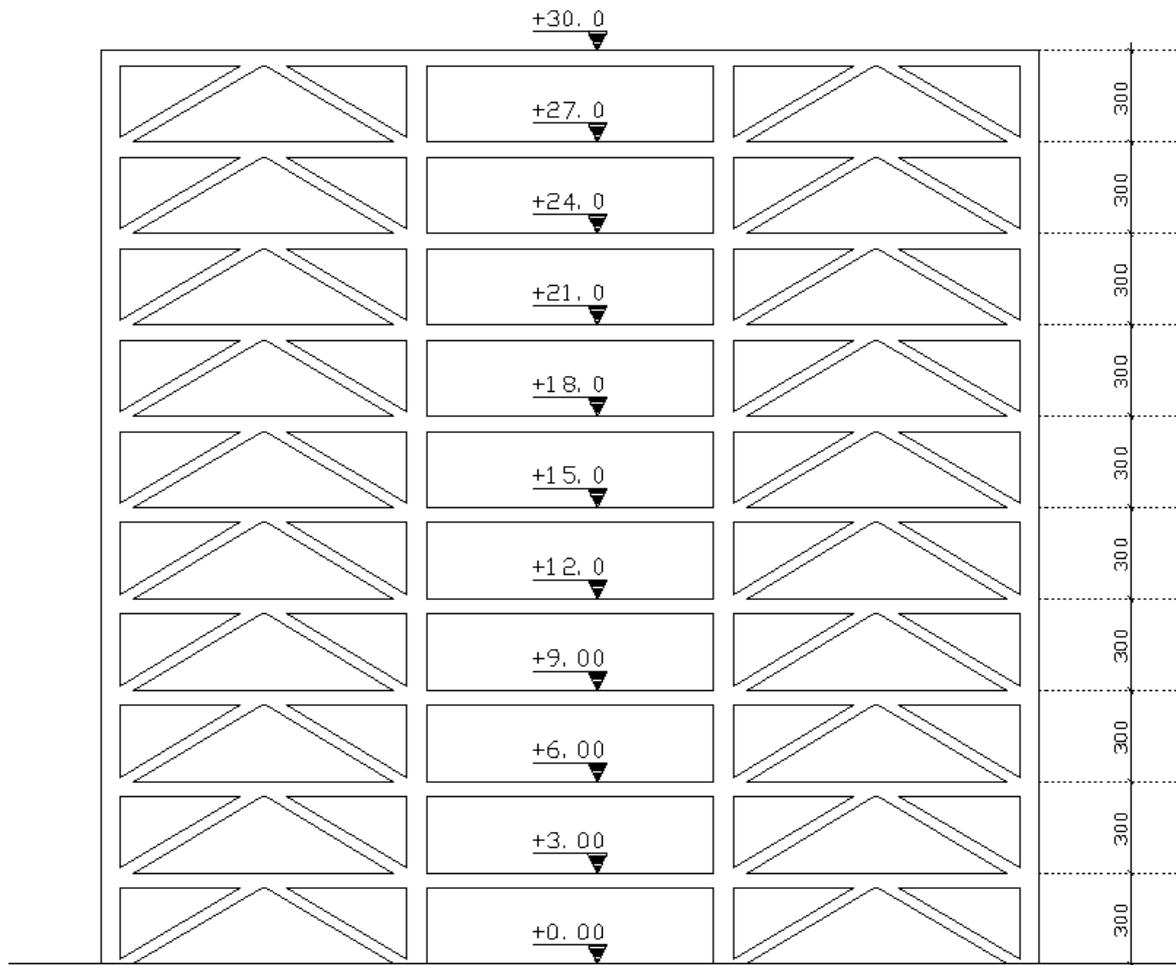
Optou-se por utilizar dois tipos de contraventamentos, sendo em “X” e em “K”, conforme mostrado nas imagens abaixo:

Figura 12 – Contraventamentos em “X”



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 – Contraventamentos em “K”



Fonte: Elaborado pelo autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão indicados os resultados dos coeficientes de arrasto, das análises P- Δ , deslocamentos horizontais interpavimentos e do topo do edifício, deslocamentos verticais das vigas, os modos de vibração e, suas respectivas frequências naturais, e o peso. Os resultados de cada modelo serão mostrados separadamente e no fim haverá comparações entre os modelos.

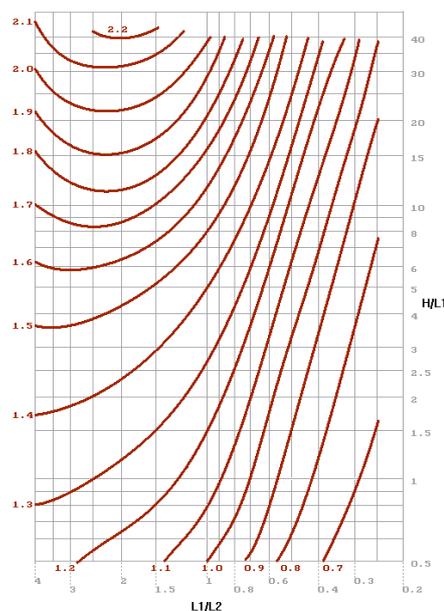
4.1 Análise da estabilidade global

Serão apresentados os coeficientes de arrasto calculados, segundo a NBR6123/1988, tal como os gráficos e os parâmetros de cálculo do P- Δ , as combinações de carga críticas, as características geométricas dos pilares e dos contraventamentos, e os deslocamentos horizontais máximos. Por fim, os resultados de cada modelo serão confrontados entre si.

4.1.1 Coeficientes de arrasto

Serão apresentados os coeficientes de arrasto estipulados, conforme preconiza o item 6.3 da norma NBR 6123/1988.

Figura 14- Coeficiente de arrasto, para edificações paralelepípidas em vento de baixa turbulência.



Fonte: NBR 6123/1998.

Utilizando o ábaco da Figura 14, obteve-se os seguintes resultados:

Tabela 6 - Coeficientes de arrasto.

| Ângulo | L1/L2 | H/L1 | Coeficiente arrasto |
|---------------|--------------|-------------|----------------------------|
| 0° | 1,00 | 1,00 | 1,14 |
| 90° | 1,00 | 1,00 | 1,14 |
| 180° | 1,00 | 1,00 | 1,14 |
| 270° | 1,00 | 1,00 | 1,14 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde “H” é referente a altura, “L1” e “L2” são as medidas dos lados da edificação em planta. Nota-se que o coeficiente de arrasto é igual para todos os ângulos de incidência do vento, pois a altura e os lados da edificação apresentam valores iguais.

4.1.2 Pilares e contraventamentos

Considerou-se inicialmente os pilares contínuos, ou seja, sem variação de geometria, mas devido ao elevado peso, optou-se pela redução destes elementos. Obtendo a seguinte configuração:

Tabela 7- Características geométricas dos pilares.

| Pilar | Pavimento | Perfil |
|-----------------------|-----------|---------------|
| 1 a 5 / 12 a 16 | 1° ao 3° | CVS 650 x 252 |
| 6, 7, 10 e 11 | | CVS 650 x 366 |
| 401 a 405 / 412 a 416 | 4° ao 6° | CVS 550 x 184 |
| 406, 407, 410 e 411 | | CVS 550 x 220 |
| 601 a 605 / 612 a 616 | 7° ao 10° | CVS 500 x 162 |
| 606, 607, 610 e 611 | | CVS 500 x 194 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O mesmo arranjo de pilares e contraventamentos foi aplicado em todos os modelos. Esses por sua vez, seguiram as seguintes configurações:

Tabela 8- Características geométricas do contraventamento.

| Contraventamento | Perfil |
|------------------|-------------|
| X | VS 350 x 51 |
| K | VS 350 x 35 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Estabilidade global

As tabelas desse capítulo expressam os resultados obtidos em todos os modelos relativos a estabilidade global da estrutura, dentre eles o somatório das cargas verticais, o ângulo de incidência do vento, o somatório das cargas horizontais, o P- Δ , o parâmetro α , os momentos de 1ª e 2ª ordem.

Tabela 9- Parâmetros de estabilidade global do modelo 1.

| Caso | Ângulo | Σ Cargas verticais | Σ Cargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P- Δ | α |
|------|--------|---------------------------|-----------------------------|------------------|------------------|-------------|----------|
| 1 | 90° | 7915,21 | 35,00 | 583,62 | 23,49 | 1,05 | 0,51 |
| 2 | 270° | 7915,21 | 35,00 | 583,62 | 23,54 | 1,05 | 0,52 |
| 3 | 0° | 7915,21 | 35,19 | 586,58 | 12,64 | 1,03 | 0,37 |
| 4 | 180° | 7915,21 | 35,19 | 586,58 | 12,63 | 1,03 | 0,37 |
| 5 | 90° | 7915,21 | 58,33 | 972,70 | 39,03 | 1,05 | 0,51 |
| 6 | 270° | 7915,21 | 58,33 | 972,70 | 39,08 | 1,05 | 0,51 |
| 7 | 0° | 7915,21 | 58,66 | 977,64 | 21,03 | 1,03 | 0,37 |
| 8 | 180° | 7915,21 | 58,66 | 977,64 | 21,02 | 1,03 | 0,37 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10- Parâmetros de estabilidade global do modelo 2.

| Caso | Ângulo | Σ Cargas verticais | Σ Cargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P- Δ | α |
|------|--------|---------------------------|-----------------------------|------------------|------------------|-------------|----------|
| 1 | 90° | 7742,34 | 35,00 | 583,62 | 22,93 | 1,05 | 0,50 |
| 2 | 270° | 7742,34 | 35,00 | 583,62 | 22,94 | 1,05 | 0,51 |
| 3 | 0° | 7742,34 | 35,19 | 586,58 | 12,37 | 1,03 | 0,37 |
| 4 | 180° | 7742,34 | 35,19 | 586,58 | 12,36 | 1,03 | 0,37 |
| 5 | 90° | 7742,34 | 58,33 | 972,70 | 38,10 | 1,05 | 0,50 |
| 6 | 270° | 7742,34 | 58,33 | 972,70 | 38,11 | 1,05 | 0,51 |
| 7 | 0° | 7742,34 | 58,66 | 977,64 | 20,58 | 1,03 | 0,37 |
| 8 | 180° | 7742,34 | 58,66 | 977,64 | 20,56 | 1,03 | 0,37 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11- Parâmetros de estabilidade global do modelo 3

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7487,95 | 35,00 | 583,62 | 23,66 | 1,05 | 0,52 |
| 2 | 270° | 7487,95 | 35,00 | 583,62 | 20,63 | 1,04 | 0,48 |
| 3 | 0° | 7487,95 | 35,19 | 586,58 | 11,95 | 1,03 | 0,36 |
| 4 | 180° | 7487,95 | 35,19 | 586,58 | 11,94 | 1,03 | 0,36 |
| 5 | 90° | 7487,95 | 58,33 | 972,70 | 38,26 | 1,05 | 0,51 |
| 6 | 270° | 7487,95 | 58,33 | 972,70 | 35,32 | 1,05 | 0,49 |
| 7 | 0° | 7487,95 | 58,66 | 977,64 | 19,88 | 1,03 | 0,36 |
| 8 | 180° | 7487,95 | 58,66 | 977,64 | 19,87 | 1,03 | 0,36 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12- Parâmetros de estabilidade global do modelo 4.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7950,80 | 35,00 | 583,62 | 23,56 | 1,05 | 0,51 |
| 2 | 270° | 7950,80 | 35,00 | 583,62 | 23,60 | 1,05 | 0,52 |
| 3 | 0° | 7950,80 | 35,19 | 586,58 | 12,70 | 1,03 | 0,37 |
| 4 | 180° | 7950,80 | 35,19 | 586,58 | 12,68 | 1,03 | 0,37 |
| 5 | 90° | 7950,80 | 58,33 | 972,70 | 39,15 | 1,05 | 0,51 |
| 6 | 270° | 7950,80 | 58,33 | 972,70 | 39,19 | 1,05 | 0,52 |
| 7 | 0° | 7950,80 | 58,66 | 977,64 | 21,12 | 1,03 | 0,37 |
| 8 | 180° | 7950,80 | 58,66 | 977,64 | 22,11 | 1,03 | 0,37 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13- Parâmetros de estabilidade global do modelo 5.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7742,34 | 35,00 | 583,62 | 22,93 | 1,05 | 0,50 |
| 2 | 270° | 7742,34 | 35,00 | 583,62 | 22,94 | 1,05 | 0,51 |
| 3 | 0° | 7742,34 | 35,19 | 586,58 | 12,35 | 1,03 | 0,37 |
| 4 | 180° | 7742,34 | 35,19 | 586,58 | 12,36 | 1,03 | 0,37 |
| 5 | 90° | 7742,34 | 58,33 | 972,70 | 38,10 | 1,05 | 0,50 |
| 6 | 270° | 7742,34 | 58,33 | 972,70 | 38,10 | 1,05 | 0,51 |
| 7 | 0° | 7742,34 | 58,66 | 977,64 | 20,56 | 1,03 | 0,37 |
| 8 | 180° | 7742,34 | 58,66 | 977,64 | 20,57 | 1,03 | 0,37 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14- Parâmetros de estabilidade global do modelo 6.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7488,13 | 35,00 | 583,62 | 23,68 | 1,05 | 0,52 |
| 2 | 270° | 7488,13 | 35,00 | 583,62 | 20,62 | 1,04 | 0,48 |
| 3 | 0° | 7488,13 | 35,19 | 586,58 | 11,95 | 1,03 | 0,36 |
| 4 | 180° | 7488,13 | 35,19 | 586,58 | 11,94 | 1,03 | 0,36 |
| 5 | 90° | 7488,13 | 58,33 | 972,70 | 38,28 | 1,05 | 0,51 |
| 6 | 270° | 7488,13 | 58,33 | 972,70 | 35,33 | 1,05 | 0,49 |
| 7 | 0° | 7488,13 | 58,66 | 977,64 | 19,88 | 1,03 | 0,36 |
| 8 | 180° | 7488,13 | 58,66 | 977,64 | 19,87 | 1,03 | 0,36 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15- Parâmetros de estabilidade global do modelo 7.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7907,69 | 35,00 | 583,62 | 23,47 | 1,05 | 0,51 |
| 2 | 270° | 7907,69 | 35,00 | 583,62 | 23,51 | 1,05 | 0,52 |
| 3 | 0° | 7907,69 | 35,19 | 586,58 | 13,86 | 1,03 | 0,38 |
| 4 | 180° | 7907,69 | 35,19 | 586,58 | 17,65 | 1,04 | 0,44 |
| 5 | 90° | 7907,69 | 58,33 | 972,70 | 39,00 | 1,05 | 0,51 |
| 6 | 270° | 7907,69 | 58,33 | 972,70 | 39,03 | 1,05 | 0,51 |
| 7 | 0° | 7907,69 | 58,66 | 977,64 | 24,38 | 1,03 | 0,40 |
| 8 | 180° | 7907,69 | 58,66 | 977,64 | 28,03 | 1,03 | 0,43 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 16- Parâmetros de estabilidade global do modelo 8.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7907,69 | 35,00 | 583,62 | 23,47 | 1,05 | 0,51 |
| 2 | 270° | 7907,69 | 35,00 | 583,62 | 23,51 | 1,05 | 0,52 |
| 3 | 0° | 7907,69 | 35,19 | 586,58 | 13,86 | 1,03 | 0,38 |
| 4 | 180° | 7907,69 | 35,19 | 586,58 | 17,65 | 1,04 | 0,44 |
| 5 | 90° | 7907,69 | 58,33 | 972,70 | 39,00 | 1,05 | 0,51 |
| 6 | 270° | 7907,69 | 58,33 | 972,70 | 39,03 | 1,05 | 0,51 |
| 7 | 0° | 7907,69 | 58,66 | 977,64 | 24,38 | 1,03 | 0,40 |
| 8 | 180° | 7907,69 | 58,66 | 977,64 | 28,03 | 1,03 | 0,43 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 17- Parâmetros de estabilidade global do modelo 9.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7480,43 | 35,00 | 583,62 | 23,63 | 1,05 | 0,51 |
| 2 | 270° | 7480,43 | 35,00 | 583,62 | 20,62 | 1,04 | 0,48 |
| 3 | 0° | 7480,43 | 35,19 | 586,58 | 13,60 | 1,03 | 0,38 |
| 4 | 180° | 7480,43 | 35,19 | 586,58 | 16,17 | 1,04 | 0,42 |
| 5 | 90° | 7480,43 | 58,33 | 972,70 | 38,21 | 1,05 | 0,51 |
| 6 | 270° | 7480,43 | 58,33 | 972,70 | 35,31 | 1,05 | 0,49 |
| 7 | 0° | 7480,43 | 58,66 | 977,64 | 23,50 | 1,03 | 0,39 |
| 8 | 180° | 7480,43 | 58,66 | 977,64 | 26,02 | 1,03 | 0,41 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18- Parâmetros de estabilidade global do modelo 10.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7943,28 | 35,00 | 583,62 | 23,54 | 1,05 | 0,51 |
| 2 | 270° | 7943,28 | 35,00 | 583,62 | 23,58 | 1,05 | 0,52 |
| 3 | 0° | 7943,28 | 35,19 | 586,58 | 16,36 | 1,04 | 0,42 |
| 4 | 180° | 7943,28 | 35,19 | 586,58 | 16,36 | 1,04 | 0,42 |
| 5 | 90° | 7943,28 | 58,33 | 972,70 | 39,11 | 1,05 | 0,51 |
| 6 | 270° | 7943,28 | 58,33 | 972,70 | 39,15 | 1,05 | 0,52 |
| 7 | 0° | 7943,28 | 58,66 | 977,64 | 27,21 | 1,04 | 0,42 |
| 8 | 180° | 7943,28 | 58,66 | 977,64 | 27,21 | 1,04 | 0,42 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 19- Parâmetros de estabilidade global do modelo 11.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7734,82 | 35,00 | 583,62 | 22,91 | 1,05 | 0,50 |
| 2 | 270° | 7734,82 | 35,00 | 583,62 | 22,92 | 1,05 | 0,51 |
| 3 | 0° | 7734,82 | 35,19 | 586,58 | 15,89 | 1,03 | 0,41 |
| 4 | 180° | 7734,82 | 35,19 | 586,58 | 15,96 | 1,03 | 0,41 |
| 5 | 90° | 7734,82 | 58,33 | 972,70 | 38,06 | 1,05 | 0,50 |
| 6 | 270° | 7734,82 | 58,33 | 972,70 | 38,07 | 1,05 | 0,51 |
| 7 | 0° | 7734,82 | 58,66 | 977,64 | 26,45 | 1,03 | 0,41 |
| 8 | 180° | 7734,82 | 58,66 | 977,64 | 26,52 | 1,03 | 0,41 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20- Parâmetros de estabilidade global do modelo 12.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7480,43 | 35,00 | 583,62 | 23,63 | 1,05 | 0,51 |
| 2 | 270° | 7480,43 | 35,00 | 583,62 | 20,62 | 1,04 | 0,48 |
| 3 | 0° | 7480,43 | 35,19 | 586,58 | 13,60 | 1,03 | 0,38 |
| 4 | 180° | 7480,43 | 35,19 | 586,58 | 16,17 | 1,04 | 0,42 |
| 5 | 90° | 7480,43 | 58,33 | 972,70 | 38,21 | 1,05 | 0,51 |
| 6 | 270° | 7480,43 | 58,33 | 972,70 | 35,31 | 1,05 | 0,49 |
| 7 | 0° | 7480,43 | 58,66 | 977,64 | 23,50 | 1,03 | 0,39 |
| 8 | 180° | 7480,43 | 58,66 | 977,64 | 26,02 | 1,03 | 0,41 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 21- Parâmetros de estabilidade global do modelo 13.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7910,84 | 35,00 | 583,62 | 21,89 | 1,05 | 0,50 |
| 2 | 270° | 7910,84 | 35,00 | 583,62 | 21,93 | 1,05 | 0,50 |
| 3 | 0° | 7910,84 | 35,19 | 586,58 | 12,63 | 1,03 | 0,37 |
| 4 | 180° | 7910,84 | 35,19 | 586,58 | 12,62 | 1,03 | 0,37 |
| 5 | 90° | 7910,84 | 58,33 | 972,70 | 36,38 | 1,05 | 0,50 |
| 6 | 270° | 7910,84 | 58,33 | 972,70 | 36,42 | 1,05 | 0,50 |
| 7 | 0° | 7910,84 | 58,66 | 977,64 | 21,01 | 1,03 | 0,37 |
| 8 | 180° | 7910,84 | 58,66 | 977,64 | 20,99 | 1,03 | 0,37 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 22- Parâmetros de estabilidade global do modelo 14.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7753,48 | 35,00 | 583,62 | 21,70 | 1,05 | 0,49 |
| 2 | 270° | 7753,48 | 35,00 | 583,62 | 21,33 | 1,05 | 0,49 |
| 3 | 0° | 7753,48 | 35,19 | 586,58 | 12,50 | 1,03 | 0,37 |
| 4 | 180° | 7753,48 | 35,19 | 586,58 | 12,26 | 1,03 | 0,36 |
| 5 | 90° | 7753,48 | 58,33 | 972,70 | 35,94 | 1,05 | 0,49 |
| 6 | 270° | 7753,48 | 58,33 | 972,70 | 35,57 | 1,05 | 0,49 |
| 7 | 0° | 7753,48 | 58,66 | 977,64 | 20,71 | 1,03 | 0,37 |
| 8 | 180° | 7753,48 | 58,66 | 977,64 | 20,49 | 1,03 | 0,37 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 23- Parâmetros de estabilidade global do modelo 15.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7491,52 | 35,00 | 583,62 | 21,49 | 1,05 | 0,49 |
| 2 | 270° | 7491,52 | 35,00 | 583,62 | 21,53 | 1,05 | 0,49 |
| 3 | 0° | 7491,52 | 35,19 | 586,58 | 11,94 | 1,03 | 0,36 |
| 4 | 180° | 7491,52 | 35,19 | 586,58 | 11,93 | 1,03 | 0,36 |
| 5 | 90° | 7491,52 | 58,33 | 972,70 | 35,73 | 1,05 | 0,49 |
| 6 | 270° | 7491,52 | 58,33 | 972,70 | 35,76 | 1,05 | 0,49 |
| 7 | 0° | 7491,52 | 58,66 | 977,64 | 19,86 | 1,03 | 0,36 |
| 8 | 180° | 7491,52 | 58,66 | 977,64 | 19,85 | 1,03 | 0,36 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 24- Parâmetros de estabilidade global do modelo 16.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7905,61 | 35,00 | 583,62 | 22,10 | 1,05 | 0,50 |
| 2 | 270° | 7905,61 | 35,00 | 583,62 | 21,75 | 1,05 | 0,50 |
| 3 | 0° | 7905,61 | 35,19 | 586,58 | 12,69 | 1,03 | 0,37 |
| 4 | 180° | 7905,61 | 35,19 | 586,58 | 12,57 | 1,03 | 0,37 |
| 5 | 90° | 7905,61 | 58,33 | 972,70 | 36,60 | 1,05 | 0,50 |
| 6 | 270° | 7905,61 | 58,33 | 972,70 | 36,25 | 1,05 | 0,50 |
| 7 | 0° | 7905,61 | 58,66 | 977,64 | 21,06 | 1,03 | 0,37 |
| 8 | 180° | 7905,61 | 58,66 | 977,64 | 20,95 | 1,03 | 0,37 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 25- Parâmetros de estabilidade global do modelo 17.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7753,48 | 35,00 | 583,62 | 21,70 | 1,05 | 0,49 |
| 2 | 270° | 7753,48 | 35,00 | 583,62 | 21,33 | 1,05 | 0,49 |
| 3 | 0° | 7753,48 | 35,19 | 586,58 | 12,50 | 1,03 | 0,37 |
| 4 | 180° | 7753,48 | 35,19 | 586,58 | 12,26 | 1,03 | 0,36 |
| 5 | 90° | 7753,48 | 58,33 | 972,70 | 35,94 | 1,05 | 0,49 |
| 6 | 270° | 7753,48 | 58,33 | 972,70 | 35,57 | 1,05 | 0,49 |
| 7 | 0° | 7753,48 | 58,66 | 977,64 | 20,71 | 1,03 | 0,37 |
| 8 | 180° | 7753,48 | 58,66 | 977,64 | 20,49 | 1,03 | 0,37 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 26- Parâmetros de estabilidade global do modelo 18.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7477,91 | 35,00 | 583,62 | 21,71 | 1,05 | 0,49 |
| 2 | 270° | 7477,91 | 35,00 | 583,62 | 21,33 | 1,05 | 0,49 |
| 3 | 0° | 7477,91 | 35,19 | 586,58 | 11,89 | 1,03 | 0,36 |
| 4 | 180° | 7477,91 | 35,19 | 586,58 | 11,96 | 1,03 | 0,36 |
| 5 | 90° | 7477,91 | 58,33 | 972,70 | 35,95 | 1,05 | 0,49 |
| 6 | 270° | 7477,91 | 58,33 | 972,70 | 35,56 | 1,05 | 0,49 |
| 7 | 0° | 7477,91 | 58,66 | 977,64 | 19,81 | 1,03 | 0,36 |
| 8 | 180° | 7477,91 | 58,66 | 977,64 | 19,88 | 1,03 | 0,36 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 27- Parâmetros de estabilidade global do modelo 19.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7903,32 | 35,00 | 583,62 | 21,86 | 1,05 | 0,49 |
| 2 | 270° | 7903,32 | 35,00 | 583,62 | 21,89 | 1,05 | 0,50 |
| 3 | 0° | 7903,32 | 35,19 | 586,58 | 16,10 | 1,03 | 0,42 |
| 4 | 180° | 7903,32 | 35,19 | 586,58 | 16,10 | 1,03 | 0,42 |
| 5 | 90° | 7903,32 | 58,33 | 972,70 | 36,34 | 1,05 | 0,49 |
| 6 | 270° | 7903,32 | 58,33 | 972,70 | 36,37 | 1,05 | 0,50 |
| 7 | 0° | 7903,32 | 58,66 | 977,64 | 26,78 | 1,03 | 0,42 |
| 8 | 180° | 7903,32 | 58,66 | 977,64 | 26,78 | 1,03 | 0,42 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 28- Parâmetros de estabilidade global do modelo 20.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7745,96 | 35,00 | 583,62 | 21,65 | 1,05 | 0,49 |
| 2 | 270° | 7745,96 | 35,00 | 583,62 | 21,33 | 1,05 | 0,49 |
| 3 | 0° | 7745,96 | 35,19 | 586,58 | 16,03 | 1,03 | 0,42 |
| 4 | 180° | 7745,96 | 35,19 | 586,58 | 15,81 | 1,03 | 0,41 |
| 5 | 90° | 7745,96 | 58,33 | 972,70 | 35,87 | 1,05 | 0,49 |
| 6 | 270° | 7745,96 | 58,33 | 972,70 | 35,55 | 1,05 | 0,49 |
| 7 | 0° | 7745,96 | 58,66 | 977,64 | 26,59 | 1,03 | 0,41 |
| 8 | 180° | 7745,96 | 58,66 | 977,64 | 26,38 | 1,03 | 0,41 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 29- Parâmetros de estabilidade global do modelo 21.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7481,35 | 35,00 | 583,62 | 21,45 | 1,05 | 0,49 |
| 2 | 270° | 7481,35 | 35,00 | 583,62 | 21,49 | 1,05 | 0,49 |
| 3 | 0° | 7481,35 | 35,19 | 586,58 | 15,21 | 1,03 | 0,40 |
| 4 | 180° | 7481,35 | 35,19 | 586,58 | 15,21 | 1,03 | 0,40 |
| 5 | 90° | 7481,35 | 58,33 | 972,70 | 35,66 | 1,05 | 0,49 |
| 6 | 270° | 7481,35 | 58,33 | 972,70 | 35,70 | 1,05 | 0,49 |
| 7 | 0° | 7481,35 | 58,66 | 977,64 | 25,30 | 1,03 | 0,40 |
| 8 | 180° | 7481,35 | 58,66 | 977,64 | 25,30 | 1,03 | 0,40 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 30- Parâmetros de estabilidade global do modelo 22.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7903,32 | 35,00 | 583,62 | 21,86 | 1,05 | 0,49 |
| 2 | 270° | 7903,32 | 35,00 | 583,62 | 21,89 | 1,05 | 0,50 |
| 3 | 0° | 7903,32 | 35,19 | 586,58 | 16,10 | 1,03 | 0,42 |
| 4 | 180° | 7903,32 | 35,19 | 586,58 | 16,10 | 1,03 | 0,42 |
| 5 | 90° | 7903,32 | 58,33 | 972,70 | 36,34 | 1,05 | 0,49 |
| 6 | 270° | 7903,32 | 58,33 | 972,70 | 36,37 | 1,05 | 0,50 |
| 7 | 0° | 7903,32 | 58,66 | 977,64 | 26,78 | 1,03 | 0,42 |
| 8 | 180° | 7903,32 | 58,66 | 977,64 | 26,78 | 1,03 | 0,42 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 31- Parâmetros de estabilidade global do modelo 23.

| Caso | Ângulo | ΣCargas verticais | ΣCargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P-Δ | α |
|------|--------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|------|------|
| 1 | 90° | 7745,96 | 35,00 | 583,62 | 21,65 | 1,05 | 0,49 |
| 2 | 270° | 7745,96 | 35,00 | 583,62 | 21,33 | 1,05 | 0,49 |
| 3 | 0° | 7745,96 | 35,19 | 586,58 | 16,03 | 1,03 | 0,42 |
| 4 | 180° | 7745,96 | 35,19 | 586,58 | 15,81 | 1,03 | 0,41 |
| 5 | 90° | 7745,96 | 58,33 | 972,70 | 35,87 | 1,05 | 0,49 |
| 6 | 270° | 7745,96 | 58,33 | 972,70 | 35,55 | 1,05 | 0,49 |
| 7 | 0° | 7745,96 | 58,66 | 977,64 | 26,59 | 1,03 | 0,41 |
| 8 | 180° | 7745,96 | 58,66 | 977,64 | 26,38 | 1,03 | 0,41 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 32- Parâmetros de estabilidade global do modelo 24.

| Caso | Ângulo | Σ Cargas verticais | Σ Cargas horizontais | Momento 1ª ordem | Momento 2ª ordem | P- Δ | α |
|------|--------|---------------------------|-----------------------------|------------------|------------------|-------------|----------|
| 1 | 90° | 7481,35 | 35,00 | 583,62 | 21,45 | 1,05 | 0,49 |
| 2 | 270° | 7481,35 | 35,00 | 583,62 | 21,49 | 1,05 | 0,49 |
| 3 | 0° | 7481,35 | 35,19 | 586,58 | 15,21 | 1,03 | 0,40 |
| 4 | 180° | 7481,35 | 35,19 | 586,58 | 15,21 | 1,03 | 0,40 |
| 5 | 90° | 7481,35 | 58,33 | 972,70 | 35,66 | 1,05 | 0,49 |
| 6 | 270° | 7481,35 | 58,33 | 972,70 | 35,70 | 1,05 | 0,49 |
| 7 | 0° | 7481,35 | 58,66 | 977,64 | 25,30 | 1,03 | 0,40 |
| 8 | 180° | 7481,35 | 58,66 | 977,64 | 25,30 | 1,03 | 0,40 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

- Caso - Caso de combinações de ações;
- Ângulo - Ângulo de incidência vento;
- α - Parâmetro de instabilidade para estrutura reticulada simétrica;

Os valores apresentados na tabela são característicos e não estão multiplicados pelos coeficientes de ponderação de cargas. Os somatórios das cargas verticais e horizontais estão em “tf” e os momentos de 1ª e 2ª ordem estão em “tf.m”.

4.1.4 Análise dos deslocamentos horizontais máximos

Nessa seção demonstrados os deslocamentos horizontais máximos obtidos em cada modelo e por fim, serão comparados os valores.

Tabela 33 - Deslocamentos horizontais máximos no topo do edifício.

| Modelo | Deslocamentos no topo | |
|--------|-----------------------|---------|
| | X | Y |
| 1 | 0,12 cm | 0,22 cm |
| 2 | 0,12 cm | 0,22 cm |
| 3 | 0,12 cm | 0,22 cm |
| 4 | 0,12 cm | 0,22 cm |
| 5 | 0,12 cm | 0,22 cm |
| 6 | 0,12 cm | 0,22 cm |
| 7 | 0,14 cm | 0,22 cm |
| 8 | 0,15 cm | 0,22 cm |
| 9 | 0,14 cm | 0,22 cm |
| 10 | 0,15 cm | 0,22 cm |
| 11 | 0,15 cm | 0,22 cm |
| 12 | 0,14 cm | 0,22 cm |
| 13 | 0,12 cm | 0,20 cm |
| 14 | 0,12 cm | 0,20 cm |
| 15 | 0,12 cm | 0,21 cm |
| 16 | 0,12 cm | 0,20 cm |
| 17 | 0,12 cm | 0,20 cm |
| 18 | 0,12 cm | 0,21 cm |
| 19 | 0,15 cm | 0,20 cm |
| 20 | 0,15 cm | 0,21 cm |
| 21 | 0,15 cm | 0,21 cm |
| 22 | 0,15 cm | 0,20 cm |
| 23 | 0,15 cm | 0,21 cm |
| 24 | 0,15 cm | 0,21 cm |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os deslocamentos no topo do edifício estão dentro do limite normativo (7,50 cm) imposto pela NBR8800/2008. Nota-se que os resultados tem variação máxima de 25% no eixo X e de 10% no eixo Y.

Tabela 34 - Deslocamentos horizontais máximos entre pisos do edifício.

| Modelo | Deslocamentos entre pisos | |
|--------|---------------------------|---------|
| | X | Y |
| 1 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 2 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 3 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 4 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 5 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 6 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 7 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 8 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 9 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 10 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 11 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 12 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 13 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 14 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 15 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 16 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 17 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 18 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 19 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 20 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 21 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 22 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 23 | 0,02 cm | 0,03 cm |
| 24 | 0,02 cm | 0,03 cm |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os deslocamentos máximos estão dentro do limite normativo imposto pela NBR8800/2008. Observa-se que todos os modelos tiveram valores iguais.

4.3 Análise das frequências naturais

Nesse tópico serão apresentados os resultados dos modos de vibração do piso, tal como as frequências naturais e os autovalores.

Tabela 35- Modos de vibração, frequência e autovalores.

| Modelo | Frequência natural | | Autovalor |
|--------|--------------------|-------|-----------|
| | Hertz | rad/s | |
| 1 | 4,00 | 25,11 | 630,27 |
| 2 | 4,18 | 26,26 | 689,65 |
| 3 | 4,30 | 27,02 | 730,23 |
| 4 | 4,00 | 25,10 | 629,98 |
| 5 | 4,18 | 26,26 | 689,59 |
| 6 | 4,30 | 27,02 | 730,23 |
| 7 | 4,01 | 25,18 | 633,78 |
| 8 | 4,18 | 26,26 | 689,79 |
| 9 | 4,29 | 26,94 | 725,79 |
| 10 | 4,00 | 25,13 | 631,59 |
| 11 | 4,18 | 26,26 | 689,79 |
| 12 | 4,29 | 26,94 | 725,79 |
| 13 | 4,06 | 25,48 | 649,25 |
| 14 | 4,00 | 24,96 | 623,22 |
| 15 | 4,04 | 25,38 | 644,01 |
| 16 | 4,02 | 25,23 | 636,45 |
| 17 | 4,00 | 24,96 | 623,22 |
| 18 | 4,00 | 25,02 | 625,74 |
| 19 | 4,00 | 24,64 | 607,24 |
| 20 | 4,02 | 24,72 | 583,94 |
| 21 | 4,01 | 24,68 | 601,82 |
| 22 | 4,00 | 24,64 | 607,24 |
| 23 | 4,02 | 24,72 | 583,94 |
| 24 | 4,01 | 24,68 | 601,82 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Importante salientar que foram analisados a frequência natural do 2º modo de vibração.

Nota-se que todos os valores obedecem o limite normativo, proposto pela ABNT NBR

8800/2008 é de 4 Hz.

4.4 Análise das taxas de aço

Nessa seção somente esses modelos nessa seção serão mostrados os consumos de aço em cada modelo analisado.

Tabela 36 – Taxas de aço dos modelos estudados.

| Modelos | Taxa de aço |
|----------------|------------------------|
| 1 e 4 | 45,4 kg/m ² |
| 2 e 5 | 51,8 kg/m ² |
| 3 e 6 | 58,2 kg/m ² |
| 7 e 10 | 44,6 kg/m ² |
| 8 e 11 | 51,0 kg/m ² |
| 9 e 12 | 57,4 kg/m ² |
| 13 e 16 | 53,7 kg/m ² |
| 14 e 17 | 54,3 kg/m ² |
| 15 e 18 | 65,5 kg/m ² |
| 19 e 22 | 52,9 kg/m ² |
| 20 e 23 | 53,5 kg/m ² |
| 21 e 24 | 64,7 kg/m ² |

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o dimensionamento e verificação de 24 modelos estruturais. Variou-se o número de vigas secundárias, os contraventamentos, o sentido das vigas secundárias e a condição de construção escorada e não-escorada. A partir dos resultados, realizou-se análises comparativas buscando encontrar o lançamento estrutural mais econômico. Conclui-se que os contraventamentos em “K” são mais eficientes que o sistema aporticado e os contraventamentos em “X”. Todos os modelos estudados foram classificados como edifícios de pequena deslocabilidade, por apresentarem $P-\Delta$ inferiores a 1,1.

As frequências naturais de cada modelo tiveram resultados bem próximos, com variação máxima de 7,5%. Todos os casos atendem o critério normativo de frequências naturais superiores a 4 Hz.

Dentre as concepções estruturais estudadas, a que apresentou a menor taxa de consumo de aço foi aquela utilizadas nos modelos 7 e 10, que totalizaram, 44,6 kg/m. Logo concluí-se que o modelo 10, seria o mais econômico por não apresentar necessidade de escoramento durante a construção.

REFERÊNCIAS

- ALVA, Gerson Moacyr Sisniegas. **Sobre o projeto de edifícios em estrutura mista aço-concreto**. 2000. 277 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- BELLEI, Ildony H., PINHO, Fernando O., PINHO, Mauro O. **Edifícios de múltiplos andares em aço**. 2.ed. São Paulo: Pini, 2008.
- CAMARGO, Rafael Eclache Moreira de. **Contribuição ao estudo da estabilidade de edifícios de andares múltiplos em aço**. 2012. 312 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- CAMARGO, Rafael Eclache Moreira de;SÁLES, José Jairo de. **Estudo sobre a estabilidade de edifícios de múltiplos andares em aço**. Artigo científico- 8º Congresso Latino-americano da Construção Metálica. São Paulo, 2019.
- FABRIZZI, Marcela de Arruda. **Contribuição para o projeto e dimensionamento de edifícios de múltiplos andares com elementos estruturais mistos aço-concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). 233 f. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos 2007.
- FAKURY, Ricardo H.; SILVA, Ana Lydia Reis; CALDAS, Rodrigo Barreto. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. 1 ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.
- MARASCHIN, Maurício. **Projeto estrutural de edifício comercial multipavimentos: elaboração empregando aço**. 2014. 203 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- OLIVEIRA, Leticia Cardoso de. **Estudo comparativo entre estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto aplicadas a edifícios de múltiplos andares**. 2018. 155 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2018.

PFEIL, Walter, PFEIL, Michèle. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 8a ed., Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2016.

POLIZEL, Aline Montanher. **Análise comparativa da relação entre a concepção estrutural e os quantitativos resultantes no dimensionamento de edificações multipavimentos com o auxílio de sistemas computacionais integrados**. 2018. 133 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2018.

QUEIROZ, Gilson, PIMENTA, Roberval José, MARTINS, Alexander Galvão. **Estruturas mistas. Volume 1**. 68 f. (Série Manual de Construção em Aço) – Instituto Aço Brasil/CBCA, Rio de Janeiro, 2012.

REBELLO, Yopanan Conrado Pereira. **Bases para projeto estrutural na arquitetura**. 5 ed. São Paulo: Ziguarte, 2007. 286 p.

SÁLES, José Jairo de. **Estudo do projeto e da construção de edifícios de andares múltiplos com estrutura de aço**. 1995. 257 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

VASCONCELLOS, Alexandre L. Caracterização das construções mistas aço/concreto. **Revista de construção metálica**, 71 ed., 2006.