

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

LORENA BINHOTI DAL' ANNIO

**ANÁLISE QUALITATIVA COMO INSTRUMENTO DE DECISÃO NA
MODELAGEM NUMÉRICA DE ESTRUTURAS**

FLORIANÓPOLIS, 2020.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

LORENA BINHOTI DAL' ANNIO

**ANÁLISE QUALITATIVA COMO INSTRUMENTO DE DECISÃO NA
MODELAGEM NUMÉRICA DE ESTRUTURAS**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de engenheira civil.

Orientador:
Prof^o Dr. André Puel

FLORIANÓPOLIS, 2020.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Dal' Annio, Lorena Binhoti

**ANÁLISE QUALITATIVA COMO INSTRUMENTO DE DECISÃO NA
MODELAGEM NUMÉRICA DE ESTRUTURAS** / Lorena Binhoti Dal' Annio;
orientação de André Puel. - Florianópolis, SC, 2020.
116 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto
Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis.
Bacharelado em Engenharia Civil.
Departamento Acadêmico de Construção Civil.
Inclui Referências.

**1. Análise qualitativa. 2. Análise numérica. 3.
Contraventamentos. 4. Kit Molas.** . I. Puel, André. II.
Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento
Acadêmico de Construção Civil. III. Título.

ANÁLISE QUALITATIVA COMO INSTRUMENTO DE DECISÃO NA MODELAGEM NUMÉRICA DE ESTRUTURAS

LORENA BINHOTI DAL' ANNIO

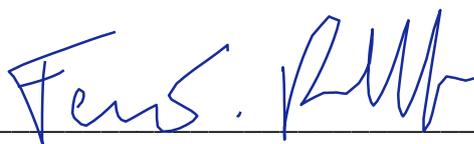
Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheira Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 06 de outubro de 2020.

Banca Examinadora:



André Puel, Dr.



Fernando Toppan Rabello, Dr.



Márcia Maria Machado Steil, Ma.

A Deus, presença constante em minha vida, aos meus pais e a minha irmã, meus alicerces.

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar, pela vida e por me amparar diante de qualquer situação.

Aos meus pais, Ilsomar e Jucilene, pelas incansáveis vezes em que me apoiaram, incentivaram e pelo amor incondicional. Devo tudo a vocês.

A minha irmã, Larissa, por sempre estar ao meu lado. Minha pessoa.

Ao meu professor e amigo, André Puel, não apenas pela excelente orientação, mas por toda atenção, dedicação e por suas palavras de incentivo.

A minha amiga e dupla de faculdade, Letícia, pelo companheirismo e amizade sem igual durante esses cinco anos de graduação. Sem você essa caminhada não teria sido tão especial.

As minhas amigas e companheiras incansáveis, Amanda e Morgana, por todo apoio, conversas e risadas. Sem vocês essa caminhada não teria sido tão especial.

Aos colegas e demais familiares pelo incentivo e pelo carinho.

Aos demais professores do Instituto Federal de Santa Catarina, pelo ensino de qualidade e por toda dedicação que têm com seus alunos.

*Se existe vontade no seu coração, fé na
sua intenção e verdade na sua emoção,
já deu certo.*

Edgard Abbehusen

RESUMO

As análises qualitativas caracterizam-se por serem estudos simplificados, uma vez que os seus resultados não são exatos e sua característica principal está relacionada a análise visual dos fenômenos que acontecem nas estruturas, enquanto que as análises numéricas têm particularidades que as tornam mais complexas. Os modelos qualitativos, são restritos a análise do comportamento elástico das estruturas uma vez que são construídos por meio das semelhanças geométricas direta entre a estrutura real e o protótipo sem ter a obrigatoriedade de reproduzir as características do material. Entre as diversas ferramentas disponíveis para a realização das análises qualitativas encontra-se o Kit Molas. Esse sistema consiste em um modelo qualitativo físico de alta deformação que tem como objetivo facilitar o entendimento a respeito do comportamento das estruturas e permitir a visualização das suas deformadas e seus deslocamentos. O modelo possibilita aplicação manual de cargas e a inclusão de elementos que enrijeçam a estrutura, tais como contraventamentos. Esses elementos são arranjos que auxiliam na absorção das solicitações laterais e diminuem ou impedem os deslocamentos. Devem ser tratados com parte indeslocável da estrutura, uma vez que têm como função manter a estabilidade global das edificações. Neste trabalho de conclusão de curso foi realizado inicialmente uma análise qualitativa com o auxílio do modelo estrutural Kit Molas, a fim de determinar arranjos estruturais, por meio do uso de contraventamentos, que se mostrem eficientes em manter a estabilidade global das estruturas. Posteriormente, foram efetuadas análises numéricas, com o auxílio do *software* Ftool, de maneira a confirmar os comportamentos estruturais já obtidos da análise qualitativa, com o intuito de facilitar a solução final de uma estrutura. Ao fim desta pesquisa constatou-se a validade das análises qualitativas como pré análises numéricas, uma vez que os resultados obtidos se mostraram satisfatórios visto que, o comportamento das estruturas qualitativas e numéricas assemelharam-se em ambas análises.

Palavras-chaves: Análise qualitativa. Análise numérica. Contraventamentos. Kit Molas.

ABSTRACT

Qualitative analyzes are characterized by being simplified studies, since their results are not accurate and their main feature is related to the visual analysis of phenomena that happen in structures, while numerical analyzes have particularities that make them more complex. Thus, the main objective of this undergraduate thesis is to use and encourage the use of qualitative analysis before to numerical analysis, in order to find the best structural solutions for buildings and reduce the distance between one analysis and another. Qualitative studies can be carried out with the help of structural models, which can be defined as analytical models that simplify more complex structures. Among the many classifications of structural models are indirect models, direct models, reduced models, dynamic models, and qualitative models. The qualitative models, focus of this coursework, are restricted to the analysis of the elastic behavior of the structures since they are constructed through direct geometric similarities between the real structural and the prototype without having to reproduce the characteristics of the material. Among the various tools available for performing qualitative analyzes is the Kit Molas. This system consists of a qualitative high deformation physical model that aims to facilitate the understanding of the behavior of the structures and allow the visualization of their deformities and their displacements. The model allows manual application of loads and the inclusion of elements that stiffen the structure, such as bracing systems. These elements are arrangements that aid in the absorption of lateral stresses and reduce or prevent dislocation. They must be treated with an indescribable part of the structure, since their function is to maintain the overall stability of the buildings. In this course conclusion work a qualitative Analysis was intianlly be carried out with the aid of the Kit Molas, in order to determine structural arrangements through, the use of braces, which are efficient in maintaining the overall stability of the structures. Subsequently, numerical analyzes were performed, with the help of Ftool software, in order to confirm the structural behaviors already obtained from th qualitative Analysis, in order to facilitate the final solution of a structure. At the end of this research, the validity of qualitative Analysis was verified as pre numerical Analysis, since the results obtained were satisfactory since the behavior of qualitative and numerical structures was similar.

Keywords: Qualitative analysis. Numerical analysis. Bracing system. Kit Molas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo didático em MDF - Pórtico	27
Figura 2 – Modelo didático em MDF- Viga	27
Figura 3 – Modelo didático em borracha	27
Figura 4 – Modelo didático Maquete Estrutural	28
Figura 5 – Primeira etapa do desenvolvimento do Kit Molas.....	29
Figura 6 – Analogia à seção transversal de uma viga	30
Figura 7 – Primeira modelagem de estruturas com o Kit Molas	30
Figura 8 - Estrutural - Kit Mola 2.....	31
Figura 9 - Estrutura de cabos – Kit Mola 3	31
Figura 10 – Chapa de base	32
Figura 11 – Ligação de base	32
Figura 12 – Esferas	32
Figura 13 – Conectores	33
Figura 14 – Ligações contínuas.....	34
Figura 15 – Molas.....	34
Figura 16 – Diagonais	35
Figura 17 – Placas	35
Figura 18 – Aplicação do carregamento manual e deformada do modelo plano.....	36
Figura 19 – Simulação no software SAP2000	36
Figura 20 – Correlação de escala	36
Figura 21 – Sobreposição das imagens	37
Figura 22 - Aplicação do carregamento manual e deformada do modelo espacial ...	38
Figura 23 – Valores limites de α para os diferentes sistemas de contraventamento .	43
Figura 24 – Isopletras da velocidade básica.....	47
Figura 25 – Valores mínimos do fator estatístico S_3	48
Figura 26 – Parâmetros meteorológicos.....	48
Figura 27 – Coeficiente de arrasto	49
Figura 28 – Núcleo estrutural	51
Figura 29 – Estrutura tubular básica	52
Figura 30 – Pórticos treliçados	54
Figura 31 – Parede estrutural.....	55
Figura 32 – Sistema <i>Outrigger</i>	56

Figura 33 – Fluxograma	59
Figura 34 – Planta de forma: Estrutura hipotética 01	60
Figura 35 – Planta de forma: Estrutura hipotética 02	60
Figura 36 – Estrutura 01: Modelo 1, Condição A.....	62
Figura 37 – Estrutura 01: Modelo 1, Condição B.....	62
Figura 38 – Estrutura 01: Modelo 1, Condição C	63
Figura 39 – Estrutura 01: Modelo 1, Condição D	63
Figura 40 – Estrutura 01: Modelo 2, Condição A.....	63
Figura 41 – Estrutura 01: Modelo 2, Condição B.....	63
Figura 42 – Estrutura 01: Modelo 2, Condição C	64
Figura 43 – Estrutura 01: Modelo 2, Condição D	64
Figura 44 – Estrutura 01: Modelo 3, Condição A.....	64
Figura 45 – Estrutura 01: Modelo 3, Condição B.....	64
Figura 46 – Estrutura 01: Modelo 3, Condição C	65
Figura 47 – Estrutura 01: Modelo 3, Condição D	65
Figura 48 – Estrutura 01: Modelo 4, Condição A.....	65
Figura 49 – Estrutura 01: Modelo 4, Condição B.....	65
Figura 50 – Estrutura 01: Modelo 4, Condição C	66
Figura 51 – Estrutura 01: Modelo 4, Condição D	66
Figura 52 – Estrutura 01: Modelo 1, Condição A.....	67
Figura 53 – Estrutura 01: Modelo 1, Condição B.....	67
Figura 54 – Estrutura 01: Modelo 1, Condição C	67
Figura 55 – Estrutura 01: Modelo 1, Condição D	67
Figura 56 – Estrutura 01: Modelo 2, Condição A.....	68
Figura 57 – Estrutura 01: Modelo 2, Condição B.....	68
Figura 58 – Estrutura 01: Modelo 2, Condição C	68
Figura 59 – Estrutura 01: Modelo 2, Condição D	68
Figura 60 – Estrutura 01: Modelo 3, Condição A.....	69
Figura 61 – Estrutura 01: Modelo 3, Condição B.....	69
Figura 62 – Estrutura 01: Modelo 3, Condição C	69
Figura 63 – Estrutura 01: Modelo 3, Condição D	69
Figura 64 – Estrutura 01: Modelo 4, Condição A.....	70
Figura 65 – Estrutura 01: Modelo 4, Condição B.....	70
Figura 66 – Estrutura 01: Modelo 4, Condição C	70

Figura 67 – Estrutura 01: Modelo 4, Condição D	70
Figura 68 – Corte estrutura hipotética 01	71
Figura 69 – Corte estrutura hipotética 02	71
Figura 70 – Incidência do vento	76
Figura 71 – Imperfeições geométricas	78
Figura 72 – Parâmetros para cálculo do comprimento efetivo	79
Figura 73 – Estrutura hipotética 01 planificada	80
Figura 74 – Estrutura hipotética 01 simplificada.....	80
Figura 75 – Carregamento pavimento zero.....	81
Figura 76 – Cargas horizontais lançadas na estrutura.....	82
Figura 77 – Deslocamentos da estrutura.....	82
Figura 78 – Coeficientes de ponderação conforme NBR 6118 (ABNT, 2014).....	83
Figura 79 – Coeficiente de redução de ações conforme NBR 6118 (ABNT, 2014)...	84
Figura 82 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 1, Condição A	94
Figura 83 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 1, Condição B	94
Figura 84 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 1, Condição C	94
Figura 85 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 1, Condição D	95
Figura 86 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 2, Condição A	96
Figura 87 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 2, Condição B	96
Figura 88 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 2, Condição C	96
Figura 89 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 2, Condição D	97
Figura 90 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 3, Condição A	98
Figura 91 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 3, Condição B	98
Figura 92 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 3, Condição C	98
Figura 93 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 3, Condição D	99
Figura 94 – Deslocamentos estrutura 01- Modelo 4, Condição A	99
Figura 95 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 3, Condição B	100
Figura 96 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 3, Condição C	100
Figura 97 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 3, Condição D	100
Figura 98 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 1, Condição A	101
Figura 99 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 1, Condição B	102
Figura 100 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 1, Condição C	102
Figura 101 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 2, Condição A	103
Figura 102 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 2, Condição B	103

Figura 103 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 2, Condição C	103
Figura 104 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 2, Condição D	104
Figura 105 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 3, Condição A	104
Figura 106 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 3, Condição B	105
Figura 107 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 3, Condição C	105
Figura 108 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 3, Condição D	105
Figura 109 – Deslocamentos estrutura 02- Modelo 4, Condição A	106
Figura 110 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 3, Condição B	106
Figura 111 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 3, Condição C	107
Figura 112 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 3, Condição D	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições de contorno e modelos	61
Tabela 2 – Parâmetros adotados para as estruturas	72
Tabela 3 – Ações verticais atuantes nas estruturas	74
Tabela 4 – Fator topográfico	74
Tabela 5 – Parâmetros para cálculo de S_2	75
Tabela 6 – Valores calculados de S_2	75
Tabela 7 – Fator estatístico	75
Tabela 8 – Velocidade característica e pressão de obstrução do vento	76
Tabela 9 – Coeficiente de arrasto	77
Tabela 10 – Força de arrasto	77
Tabela 11 – Força equivalente ao desaprumo	78
Tabela 12 – Comprimento efetivo das vigas	80
Tabela 13 – Força de tombamento aplicada nas estruturas	81
Tabela 14 – Momento de primeira ordem e momento de tombamento	85
Tabela 15 – Valores do coeficiente γ_z	86
Tabela 16 – Fator de redução de combinação quase permanente para ELS	87
Tabela 17 – Ações do vento reduzidas	87
Tabela 18 – Deslocamento no topo da estrutura	88

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Valores do coeficiente γz - Estrutura hipotética 01	89
Gráfico 2 – Valores do coeficiente γz - Estrutura hipotética 02	90
Gráfico 3 – Deslocamentos - Estrutura hipotética 01	91
Gráfico 4 – Deslocamentos - Estrutura hipotética 02	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACI – Instituto Americano de Concreto

E_{cslc} – Somatório dos valores de rigidez dos pilares na direção considerada

H_{tot} – Altura total da edificação

h_i – Extensão do elemento estrutural

kN – Quilonewtons

$M_{1,tot,d}$ – Momento de tombamento da estrutura

$\Delta M_{tot,d}$ – Somatório do produto das forças atuantes na estrutura por seus respectivos deslocamentos horizontais

N_k – Somatório das ações verticais atuantes

P_i – Carga normal atuante na estrutura

V_i – Cortante fictício a ser acrescentado na análise

$\{F_o\}$ – Vetor de esforços de imobilização dos nós da estrutura

$\{S_o\}$ – Vetor de esforços de imobilização dos nós em cada barra do sistema local da estrutura

$\{\delta\}$ – Vetor deslocamentos

$[\delta]$ – Matriz de deslocamento

$[K]$ – Matriz de rigidez da estrutura

$[K_L]$ – Matriz de rigidez local

$[T]$ – Matriz transformação

$[T]^t$ – Matriz transposta de rotação

$\{F\}$ – Matriz de ações atuantes da estrutura

α – Parâmetro de instabilidade global

γ_z – Parâmetro de instabilidade global

Δ – Deslocamento relativo entre as extremidades da estrutura

q_{vento} – Pressão de obstrução

V_k – Velocidade característica do vento

V_0 – Velocidade básica do vento

S_1 – Fator topográfico

S_2 – Fator de rugosidade

S_3 – Fator estatístico

b – Parâmetro meteorológico para obtenção de S_2

Fr – Fator de rajada para obtenção de S_2

p – Parâmetro meteorológico para obtenção de S_2

F_a – Força de arrasto

A_e – Área efetiva

C_a – Coeficiente de arrasto

f_{ck} – Resistência característica do concreto

E_{ci} – Módulo de elasticidade do concreto

E_{cs} – Módulo de elasticidade secante do concreto

θ_a – Desaprumo da estrutura

F_{gk} – Ações permanentes

F_{q1k} – Ação variável principal

F_{qjk} – Ação variável secundária

γ_q – Coeficiente de ponderação das ações variáveis

γ_g – Coeficiente de ponderação das ações permanentes

ψ_{0j} – Coeficiente redutor das ações variáveis secundárias

l_{ef} – Comprimento efetivo de uma viga

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	20
1.1	Justificativa	21
1.2	Objetivo geral	23
1.3	Objetivos específicos	23
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	Modelos estruturais	24
2.1.1	Modelo qualitativo	26
2.2	Modelo Estrutural – Kit Molas	28
2.2.1	Desenvolvimento do Kit Molas	29
2.2.2	Elementos do Kit Molas	31
2.2.2.1	<i>Chapa de base</i>	31
2.2.2.2	<i>Ligação de base</i>	32
2.2.2.3	<i>Esferas</i>	32
2.2.2.4	<i>Ligações rígidas</i>	33
2.2.2.5	<i>Ligações contínuas</i>	33
2.2.2.6	<i>Molas</i>	34
2.2.2.7	<i>Diagonais</i>	34
2.2.2.8	<i>Placas</i>	35
2.2.3	Estudos experimentais realizados com o modelo	35
2.3	Análise Numérica	38
2.3.1	<i>Software Ftool</i>	41
2.4	Estabilidade Global	41
2.4.1	Parâmetro de Instabilidade α	42
2.4.2	Coeficiente γ_z	43
2.5	Ações Atuantes nas Estruturas	45
2.5.1	Ações Permanentes	45
2.5.2	Ações Variáveis	46
2.5.2.1	<i>Ações do Vento</i>	46
2.6	Contraventamentos	50
2.6.1	Núcleos estruturais	50
2.6.2	Estruturas Tubulares	52
2.6.3	Contraventamentos Trelaçados	53
2.6.4	Parede Estrutural	54
2.6.5	<i>Outrigger</i>	55
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1	Materiais	57
3.1.1	Kit Estrutural Molas	57
3.1.2	Ftool	58
3.2	Método	58
3.2.1	Definição dos modelos	59
3.2.2	Concepção dos modelos qualitativos	61
3.2.2.1	<i>Estrutura hipotética 01</i>	62
3.2.2.2	<i>Estrutura hipotética 02</i>	66
3.2.3	Concepção dos modelos numéricos	70
3.2.3.1	<i>Módulo de elasticidade do concreto</i>	72

3.2.3.2	<i>Cargas atuantes nas estruturas</i>	73
3.2.3.3	<i>Ações do vento</i>	74
3.2.3.4	<i>Desaprumo</i>	77
3.2.3.5	<i>Modelagem no software Ftool</i>	79
3.2.3.6	<i>Combinações de ações para obtenção do coeficiente γ_z</i>	82
3.2.3.7	<i>Cálculo do coeficiente γ_z</i>	84
3.2.4	<i>Deslocamentos das estruturas</i>	86
3.2.4.1	<i>Combinações de ações para obtenção dos deslocamentos</i>	86
3.2.4.2	<i>Cálculo das ações verticais</i>	87
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	88
4.1	Coeficiente γ_z	88
4.2	Deslocamento horizontal no topo das estruturas	91
4.3	Comportamento das deformadas	93
4.3.1	Estrutura hipotética 01	93
4.3.2	Estrutura hipotética 02.....	101
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	108
	REFERÊNCIAS	110

1. INTRODUÇÃO

A estrutura de uma edificação segundo Rebello (2000) é o conjunto dos elementos - lajes, vigas e pilares - que se relacionam entre si para desempenhar a função de criar um espaço em que as pessoas exercerão diversas atividades. Para elaborar um projeto deve-se pensar na concepção estrutural, o que de acordo com Alva (2007) consiste na determinação de um arranjo adequado de todos os elementos estruturais que compõem uma edificação. Para Oliveira (2008) existe uma separação entre o estudo da concepção estrutural e o estudo matemático das estruturas. A concepção estrutural entra no campo do estudo qualitativo, onde analisa-se os fenômenos que regem o comportamento das estruturas, enquanto que, o estudo matemático diz respeito ao estudo quantitativo, onde deve-se realizar a verificação e quantificação desses fenômenos, como por exemplo as análises numéricas.

Os estudos qualitativos podem ser feitos através dos chamados modelos estruturais, visto que representam a forma das estruturas e nos permitem analisar qualitativamente o comportamento delas (BARBOSA, 2016). Desta forma, por meio da manipulação destes modelos é possível compreender os conceitos básicos acerca dos fenômenos físicos que estão presentes na estrutura real. A ideia central das análises qualitativas é que em um primeiro momento seja dado ênfase apenas ao campo qualitativo e posteriormente, que se aprofunde os estudos no campo das ciências quantitativas quanto aos fenômenos observados nos protótipos (OLIVEIRA, 2008).

Dentre as ferramentas disponíveis para a realização das análises qualitativas, encontra-se o Kit Molas, intitulado como *Maquete Estrutural* (OLIVEIRA, 2008). A *Maquete estrutural*, de acordo com Oliveira (2008) consiste em um modelo estrutural qualitativo que tem como característica principal a análise visual dos fenômenos presentes na estrutura. Assim, é possível observar o comportamento do sistema estrutural e não obter informações numéricas a partir deste modelo. O Kit Molas é um modelo físico de alta deformação idealizado para que o seu processo de manipulação seja feito de forma manual, desde a sua montagem até a aplicação de um carregamento (OLIVEIRA, 2008).

Através do Kit Molas é possível criar modelos estruturais e observar o comportamento de suas deformadas, assim como incluir nelas elementos que a enrijeçam, tais como os sistemas de contraventamento. Estes têm como função estrutural manter a estabilidade global das edificações. Chaves (2009) define os contraventamentos como arranjos que auxiliam na absorção das solicitações laterais, diminuem os deslocamentos das estruturas e que ainda podem mudar a frequência fundamental da mesma, o que reduz a possibilidade de ressonância da estrutura, contribuindo desta forma para a segurança frente aos esforços externos. São considerados elementos de contraventamento os próprios elementos que compõem a estrutura e demais arranjos (PEREIRA, 2000).

De acordo com Pereira (1997) os elementos de contraventamento devem ser tratados como parte indeslocável da estrutura. Assim, definido o arranjo a ser utilizado em uma edificação, deve-se verificar se a estrutura apresenta rigidez suficiente que vá garantir a estabilidade global da mesma. Em um primeiro momento, esta verificação foi feita por meio do modelo qualitativo Kit Molas, o qual tem como objetivo principal o desenvolvimento do conhecimento intuitivo e a simplificação das análises por meio de uma pré modelagem numérica.

Após a análise prévia dos modelos qualitativos, iniciou-se as análises numéricas, realizadas com o auxílio do *software* Ftool, com o intuito de determinar os resultados quantitativos a partir de concepções estruturais que se mostraram eficientes durante o estudo do Kit Molas, por meio do uso de contraventamentos que enrijeçam as estruturas e reduzam a sua deslocabilidade. Nesse contexto, este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo mostrar que as análises qualitativas, ao anteceder as análises numéricas, encurtam as distâncias para a solução final de uma estrutura.

1.1 Justificativa

Moncayo (2011) acredita que alguns dos novos engenheiros não possuem um conhecimento claro a respeito dos conceitos que regem o comportamento das estruturas. Uma vez que, o avanço da informática e o desenvolvimento de *softwares*, possibilitaram uma grande mudança na atuação dos engenheiros mediante à transição dos cálculos manuais para os projetos e análises por meio de computadores

(BROHN, 2005). De acordo com Moncayo (2011) os cálculos que antes eram complexos e inviáveis para serem realizados no dia a dia de um escritório, são realizados de forma simplificada e apenas por um clique. Devido a facilidade trazida pelo avanço das tecnologias e pela correria do dia a dia, muitos profissionais não se preocupam em aprofundar seus conhecimentos nestas áreas, seja por falta de tempo ou pela comodidade trazida pelos *softwares* que “tudo fazem”.

Segundo Hilson (1972) citado por Oliveira (2008) é crucial que o profissional envolvido no projeto estrutural de uma edificação tenha habilidade de visualizar e compreender o comportamento estrutural em diferentes circunstâncias e como os elementos da estrutura vão influenciar na sua conduta. Autores como Schwark (1996) acreditam que um engenheiro estrutural deve importar-se primeiramente em relacionar a concepção estrutural com a necessidade, utilidade e solução estética da edificação por meio de valores qualitativos e intuitivo, quantificando essas decisões somente em fase mais adiantada de projeto. Brohn (2005) afirma que os modelos qualitativos são esquemas visuais importantes para se alcançar este entendimento.

Dessa forma, acredita-se que o uso de modelos qualitativos como instrumentos de auxílio para uma pré-avaliação do comportamento das estruturas seja uma proposta extremamente eficiente tanto para o meio acadêmico quanto para o meio profissional. Já que essa ferramenta possibilita o desenvolvimento do conhecimento intuitivo acerca do comportamento dos sistemas estruturais e permite ao profissional verificar melhores soluções estruturais para o seu projeto antes mesmo de partir para as análises numéricas (OLIVEIRA, 2008), que são bem mais complexas quando comparadas aos estudos qualitativos.

Assim, o presente trabalho justifica-se pela necessidade em aprimorar o conhecimento qualitativo a respeito do comportamento das estruturas. Uma vez que as análises qualitativas, ao anteceder as análises numéricas, permitem selecionar melhor as opções estruturais, afim de tornar o processo de concepção estrutural mais rápido e objetivo.

1.2 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso consiste em validar o uso da análise qualitativa previamente à análise numérica com o intuito de facilitar a solução final de uma estrutura.

1.3 Objetivos específicos

Como objetivo específico tem-se:

- a) Propor protótipos qualitativos com carregamentos verticais (peso próprio, entre outros) e horizontais (vento) e observar o comportamento de suas deformadas;
- b) Encontrar soluções estruturais qualitativas, através do uso de contraventamentos disponíveis no Kit Molas, para reduzir as deformações e deslocamentos excessivos causados pelos carregamentos verticais e horizontais;
- c) Realizar a análise numérica das estruturas em estudo com o auxílio do *software* Ftool;
- d) Determinar o coeficiente γ_z das estruturas em estudo;
- e) Relacionar o comportamento das deformadas encontradas no Kit Molas com o comportamento das deformadas das análises numéricas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados assuntos pertinentes ao tema deste trabalho. Primeiramente serão discutidos conceitos a respeito dos modelos estruturais e alguns destes modelos, em especial os modelos qualitativos. Na sequência será apresentada uma breve análise acerca do modelo estrutural Kit Molas, material utilizado nesta pesquisa. Em seguida serão estudadas as análises numéricas e as ferramentas para realiza-las. Posteriormente será abordada a estabilidade global das estruturas, as cargas atuantes nela e por fim, os arranjos estruturais que tem como objetivo reduzir a sua deslocabilidade.

2.1 Modelos estruturais

De acordo com Martha (2011) os modelos estruturais, ou modelos matemáticos, são modelos analíticos que representam matematicamente uma determinada estrutura. Estes modelos associam todas as teorias que possam descrever o comportamento da estrutura por meio das leis físicas, em função das solicitações que causam deslocamentos e deformações e do equilíbrio entre forças e tensões, e ainda por meio das leis constitutivas dos materiais que compõem a estrutura.

Um modelo estrutural pode ainda ser definido como a redução de uma estrutura complexa, conhecida como protótipo, a uma estrutural simples, sem perder as características importantes do seu comportamento (REINHORN, apud MELO, 2011).

A concepção de um modelo estrutural é uma das tarefas mais importantes na análise estrutural de uma estrutura real (MARTHA, 2011), pois dessa forma pode-se prever o comportamento da estrutura antes mesmo de construí-la (HOSSDORF, 1974). Geralmente, estes modelos são construídos em escalas reduzidas, no entanto, em alguns casos quando busca-se analisar um problema localizado, os protótipos adotados são maiores que seus modelos reais (OLIVEIRA, 2008).

Existem inúmeras classificações quanto aos modelos estruturais. Conforme apresentado por Oliveira (2008) autores como Pippard (1947) e Hossdorf

(1974) classificam os modelos estruturais de acordo com a finalidade da análise que será realizada, baseando-se no tipo de experimento e no campo de aplicação e não no modelo propriamente dito. Já autores como Harris et al. (1999) e Santos (1983) classificam os modelos estruturais conforme suas próprias características. No presente estudo será considerada a classificação apresentada pelos últimos autores.

Oliveira (2008) apresenta na sua dissertação de mestrado cinco modelos estruturais: modelo indireto, modelo direto, modelo reduzido, modelo dinâmico e modelo qualitativo.

Segundo o ACI (1987) nos modelos indiretos os materiais e carregamentos não possuem relação direta ao utilizado nos protótipos e apenas o comportamento elástico linear pode ser determinado. Neste modelo busca-se aplicar cargas e deformações a fim de se obter linhas ou superfícies de influência. Assim, deduz-se as tensões nos protótipos a partir de diagramas de influência obtidos nos ensaios com os modelos reduzidos.

Os modelos diretos são aqueles que são geometricamente similares aos protótipos (OLIVEIRA, 2008) e são carregados da mesma forma que eles, sendo assim suas tensões e deformações similares as do modelo real (ACI, 1987).

Para Oliveira (2008) dentre os modelos estruturais, os modelos reduzidos estão entre os mais complexos e normalmente são aplicados em situações onde não se pode encontrar soluções numéricas adequadas apenas através de *softwares* ou outros modelos estruturais. São definidos como um elemento ou um conjunto de elementos estruturais, construídos em escala reduzida para que possam ser ensaiados e ainda para que se possa aplicar a da Teoria da Semelhança na interpretação dos resultados (JANNEY et al., apud MARTINS, 1990). Esta teoria estudada por Galileu Galilei informa a indispensabilidade da semelhança geométrica e da semelhança física que os materiais utilizados na construção do modelo reduzido e do modelo real devem ter para que os resultados obtidos por meio de ensaios possam ser representados em escala real (GALILEI, apud OLIVEIRA, 2008).

Os modelos dinâmicos são utilizados em estudos de vibrações e efeito de carregamento dinâmico nas estruturas. São empregados em estudos a respeito das cargas de vento e abalos sísmicos (ACI, 1987). Esse tipo de modelo normalmente é ensaiado em tuneis de vento, onde simula-se as ações dos ventos naturais, e para

medir a pressão do ar nas estruturas e avaliar a forma da edificação através da interação dinâmica da estrutura com a força do vento (OLIVEIRA, 2008).

Por fim, os modelos qualitativos são aqueles elaborados a partir da semelhança geométrica direta com o protótipo e com material homogêneo, porém sem necessariamente reproduzir as características específicas do material real (LOBOSCO; CÂMARA, 2018). Este modelo será melhor apresentado no item 2.1.1

2.1.1 Modelo qualitativo

Os modelos qualitativos são aqueles em que não se pode obter informações exatas, visto que esses modelos têm como característica principal a análise visual dos fenômenos que podem ocorrer na estrutura por meio de análises qualitativas (OLIVEIRA, 2008).

Estes modelos são restritos as situações de análise do comportamento elásticos das estruturas, não sendo indicados para apontar os modos de colapso da mesma, dado que são elaborados apenas a partir da semelhança geométrica direta com a estrutura proposta, sem necessariamente reproduzir as características do material do modelo real (LOBOSCO; CÂMARA, 2018).

De acordo com Oliveira (2008) esse tipo de modelo normalmente é construído com materiais homogêneos, elástico e com baixo módulo de elasticidade, como por exemplo borrachas, papeis, espumas e plásticos, acentuando as deformações para que se torne mais fácil a observação dos fenômenos.

Autores como Rebello (1992) e Schwark (1996) ressaltam a importância dos modelos qualitativos tanto para o ensino de estruturas quanto para a concepção de projetos, visto que faz parte do dia a dia do estudante de engenharia e do engenheiro estrutural a análise de cargas atuante em estruturas (BARBOSA, 2016).

Inúmeros são os modelos qualitativos que podem ser elaborados a partir dos materiais citados anteriormente. Na Figura 1 e Figura 2, observa-se um modelo qualitativo desenvolvido por Lobosco (2017) em pequenas placas de MDF cortadas a laser, onde a união das peças pode formar pórtico e vigas e suas deformações podem ser observadas após a aplicação de um carregamento.

Figura 1 – Modelo didático em MDF - Pórtico



Fonte: Adaptado de Lobosco (2017).

Figura 2 – Modelo didático em MDF- Viga



Fonte: Adaptado de Lobosco (2017).

Rodrigues et al. (2010) apresentam modelos elaborados em borracha, onde pode-se observar esforços de tração e compressão resultantes da aplicação de um carregamento na barra, enquanto que na laje pode-se observar efeitos da flexão, conforme Figura 3.

Figura 3 – Modelo didático em borracha



Fonte: Adaptado de Rodrigues, Pinto e Rodrigues (2010).

A fim de aprofundar os estudos em modelos qualitativos, Oliveira (2008) durante seu mestrado aprimorou um modelo estrutural qualitativo, intitulado pelo mesmo como *Maquete Estrutural*, conforme Figura 4, este modelo será utilizado neste estudo e será melhor apresentado no item 2.2.

Figura 4 – Modelo didático Maquete Estrutural



Fonte: Adaptado de Oliveira (2008).

2.2 Modelo Estrutural – Kit Molas

O Kit Molas, intitulado *Maquete Estrutural*, consiste em um modelo didático-experimental criado e desenvolvido pelo arquiteto Marcio Sequeira de Oliveira durante seu mestrado. O Kit Molas trata-se de um modelo estrutural qualitativo que tem como objetivo central facilitar o entendimento de estudantes de arquitetura e engenharia a respeito do comportamento das estruturas e permitir a visualização do comportamento estrutural por meio de análises qualitativas do fenômeno físico (OLIVEIRA, 2008).

A Maquete Estrutural é composta por um conjunto de peças moduladas com dimensões padronizadas que permitem a montagem e simulação de diversos sistemas estruturais, desde os mais simples como pilares, vigas, contraventamentos, arcos, pórticos, tirantes e treliças passando pela associação entre os sistemas e chegando até os mais complexos como prédios de múltiplos andares, estruturas espaciais, torres, pontes, etc. Para todos estes sistemas, o modelo permite a análise de diferentes conceitos como estabilidade estrutural, visualização dos deslocamentos e deformadas, comportamento quanto ao tipo de carregamento e condições de contorno, a influência da forma e o processo de montagem. Tudo isso aliado à praticidade de montagem, manuseio e armazenamento. (OLIVEIRA, 2008, p. 43).

De acordo com Oliveira (2008) por tratar-se de um modelo físico com alto grau de deformação o Kit Molas possibilita, além da observação dos deslocamentos e deformações, sentir a resistência e o comportamento da estrutura. Tal fato contribui imensamente para o aprendizado e para o entendimento das estruturas, visto que quanto mais sentidos humanos estiverem envolvidos em uma atividade, maior será a efetividade do processo de compreensão (SICILIANO, 1974).

Cabe ressaltar que o Kit Molas não é um modelo reduzido onde as grandezas físicas podem ser quantificadas, desta forma não se pode mensurar os

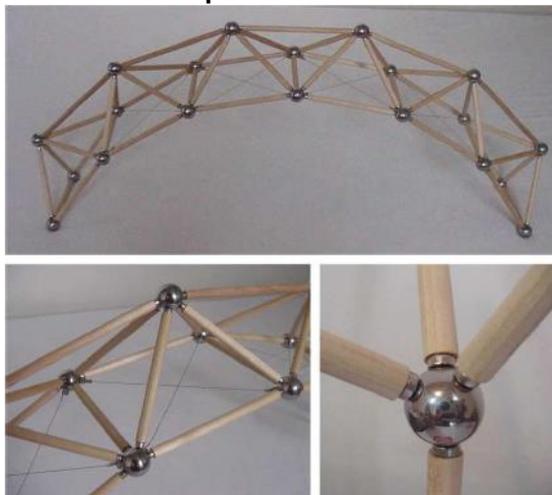
valores dos deslocamentos e das deformações encontrados através das suas análises, somente o comportamento da deformada em relação ao sistema estrutural real (OLIVEIRA, 2008).

2.2.1 Desenvolvimento do Kit Molas

Oliveira (2008) afirma que a ideia de elaborar um modelo qualitativo partiu de suas necessidades pessoais como estudante em entender melhor os fenômenos que regem o comportamento dos sistemas estruturais.

Inicialmente o modelo qualitativo foi elaborado com peças em madeira e pequenos cabos metálicos ligados por esferas metálicas constituídas em imãs, conforme Figura 5. No entanto, de acordo com Oliveira (2008), este modelo apenas possibilitava a observação do sistema estrutural como um todo, não sendo possível compreender o comportamento dos sistemas de forma isolada devido a rigidez das peças de madeira.

Figura 5 – Primeira etapa do desenvolvimento do Kit Molas

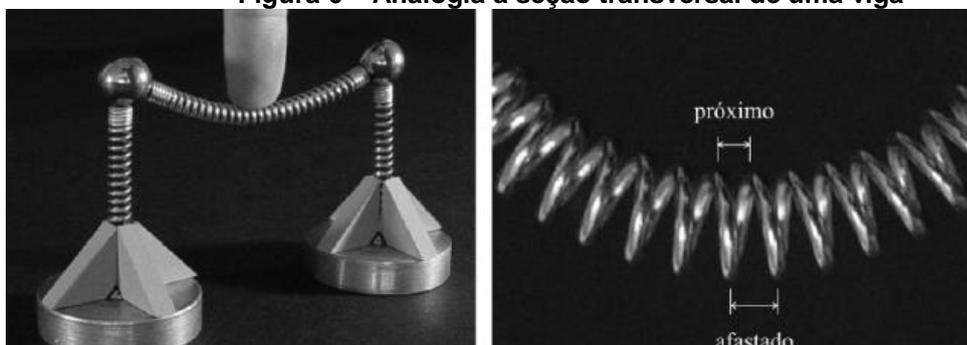


Fonte: Adaptado de Oliveira (2008).

Com o propósito de encontrar um material onde fosse possível aplicar um carregamento e após a deformação ele voltasse a seu estado original, Oliveira (2008) realizou diversos testes em diferentes materiais, tais como tubos plásticos, mangueiras de borracha, arames metálicos embutidos em mangueiras e etc.. No entanto, os resultados não foram satisfatórios e problemas como alta rigidez e alto grau de deformação foram encontrados nos materiais até então testados.

Após inúmeras tentativas chegou-se as molas metálicas e conclui-se a eficiência do material para a análise. De acordo com Oliveira (2008) foi sem dúvidas o material que melhor se adequou as necessidades do modelo. Ainda segundo o autor, além da possibilidade de observar a estrutura como um todo e cada elemento estrutural separadamente, as molas possibilitam realizar uma analogia às seções transversais de elementos estruturais, como por exemplo uma viga que é submetida a esforços de flexão e gira em torno do seu eixo horizontal apresentando esforços de compressão na parte superior e esforços de tração da parte inferior, aproximando e afastando seus elementos respectivamente, conforme Figura 6.

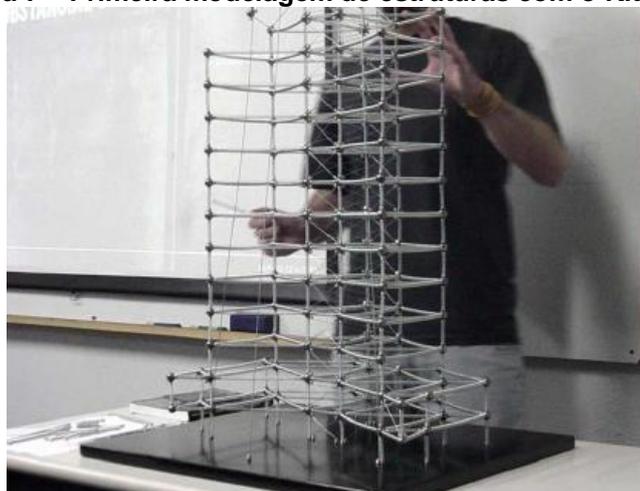
Figura 6 – Analogia à seção transversal de uma viga



Fonte: Adaptado de Oliveira (2008).

Definindo as molas como material principal do modelo, outros elementos estruturais como lajes, contraventamentos, tirantes e diferentes tipos de ligações foram incorporadas ao sistema a fim de possibilitar a elaboração de uma maior gama de estruturas. Na Figura 7 é apresentada a primeira modelagem de uma estrutura com o Kit Molas.

Figura 7 – Primeira modelagem de estruturas com o Kit Molas



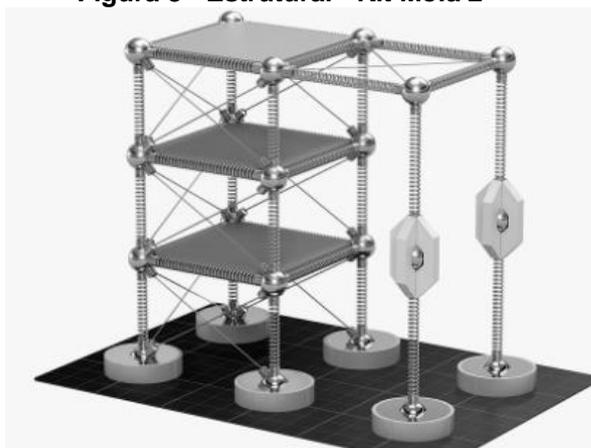
Fonte: Adaptado de Oliveira (2008).

2.2.2 Elementos do Kit Molas

Os elementos presentes no Kit Molas visam aproximar-se ao máximo de uma estrutural real. Assim, cada peça representa um elemento estrutural e conecta-se às demais através de ímãs.

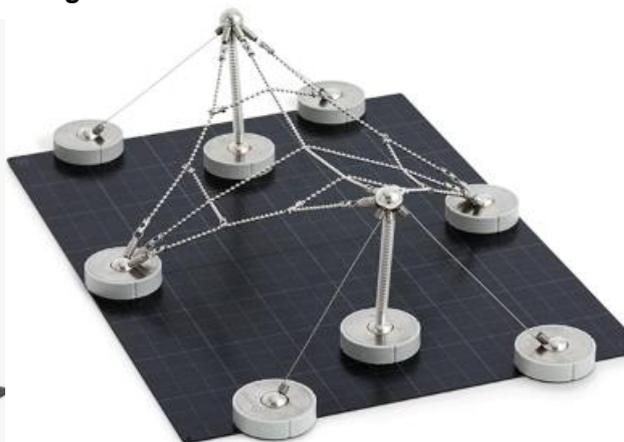
Atualmente são três os volumes do Kit Estrutural Molas: Molas 1, Molas 2 e Molas 3. Essas unidades diferenciam-se umas das outras devido aos elementos presentes em cada Kit. A medida em que os Kits vão avançando em sua numeração, torna-se possível a montagem de estruturas mais diversas, como por exemplo o Kit Molas 2 que permite enrijecer ligações entre pilares sem o uso de vigas, conforme Figura 8, e o Kit Molas 3 que possibilita a montagem das estruturas de cabo, conforme Figura 9. Os Kits são independentes um dos outros e compatíveis entre si.

Figura 8 - Estrutural - Kit Mola 2



Fonte: Adaptado de Mola Model (2019).

Figura 9 - Estrutura de cabos – Kit Mola 3

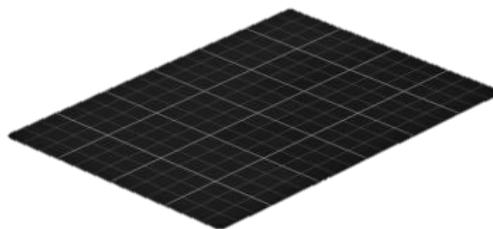


Fonte: Adaptado de Oliveira, Leite e Rebello (2019).

A seguir serão apresentados os elementos dos Kit Molas utilizados neste projeto.

2.2.2.1 Chapa de base

A chapa de base representa o solo onde a estrutura será construída e possui marcações de eixos que facilitam o posicionamento das demais peças, conforme Figura 10.

Figura 10 – Chapa de base

Fonte: Adaptado de Oliveira, Leite e Rebello (2019).

2.2.2.2 *Ligação de base*

A ligação de base, apresentada na Figura 11, representa a fundação das edificações. Essas ligações consistem em peças cilíndrica com uma esfera metálica de imã no centro. Possuem dimensões adequadas para que as demais peças possam ser utilizadas em conjunto com estas.

Figura 11 – Ligação de base

Fonte: Adaptado de Oliveira, Leite e Rebello (2019).

2.2.2.3 *Esferas*

As esferas, Figura 12, fazem o papel de conectores entre os demais elementos estruturais e representam as ligações rotuladas.

Figura 12 – Esferas

Fonte: Adaptado de Oliveira, Leite e Rebello (2019).

As esferas quando utilizadas desacompanhas de ligações rígidas, 2.2.2.4, ou de ligações contínua, 2.2.2.5, conferem a configuração rotulada a todo o sistema estrutural, seja ele viga-viga, viga-pilar ou pilar-pilar, pois permitem o giro das peças e não transmitem momento (OLIVEIRA, 2008).

2.2.2.4 *Ligações rígidas*

As ligações rígidas são representadas por conectores, os quais possuem imãs, os mesmos são utilizados para enrijecer as ligações rotuladas entre os demais elementos, conforme Figura 13.

Figura 13 – Conectores



Fonte: Adaptado de Barbosa (2016).

O sistema de ligações rígidas serve como bloqueadores de movimento, impedindo a rotação relativa entre os elementos e conseqüentemente transferindo momento (OLIVEIRA, 2008). Devem ser utilizados associadas às ligações rotuladas quando pretende-se reproduzir as ligações engastadas entre os elementos, e devem ser utilizadas em conjunto com a ligação de base, 2.2.2.2, a fim de configurar as ligações engastadas entre os elementos de fundação.

2.2.2.5 *Ligações contínuas*

Servem para dar continuidade a diferentes componentes, como vigas ou pilares, fazendo com que trabalhem como um único elemento. As ligações contínuas permitem enrijecer os pilares e manter as vigas rotuladas e vice e versa. As mesmas são representadas na Figura 14.

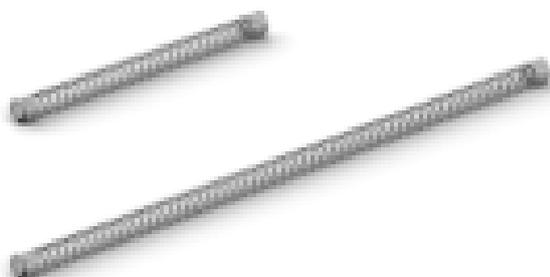
Figura 14 – Ligações contínuas

Fonte: Adaptado de Oliveira, Leite e Rebello (2019).

As ligações contínuas fazem a conexão de elementos independentes, permitindo a continuidade e a transferência de esforços entre eles (OLIVEIRA, 2008).

2.2.2.6 Molas

As molas representam as vigas e os pilares das estruturas, possibilitam grandes deformações quando carregadas e retornam a seu estado original com a retirada do carregamento. Estão presentes em duas dimensões, 74 milímetros e 162 milímetros, conforme Figura 15.

Figura 15 – Molas

Fonte: Adaptado de Oliveira, Leite e Rebello (2019).

2.2.2.7 Diagonais

São elementos esbeltos e apresentam pouca resistência a compressão. Representam os tirantes e contraventamentos das estruturas, conforme Figura 16.

Esses componentes respondem somente a esforços de tração e flambam facilmente quando submetidos a esforços de compressão. São indicados para travamentos horizontais e verticais, o que os torna elementos fundamentais para garantir a estabilidade global da estrutura (BARBOSA, 2016).

Figura 16 – Diagonais

Fonte: Adaptado de Oliveira, Leite e Rebello (2019).

2.2.2.8 Placas

As placas, apresentadas na Figura 17, são elementos rígidos que podem desempenhar o papel de paredes estruturais, lajes ou coberturas. Assim como as demais peças, as placas também possuem imãs ao longo do seu perímetro, facilitando a união com as demais peças.

Figura 17 – Placas

Fonte: Adaptado de Oliveira, Leite e Rebello (2019).

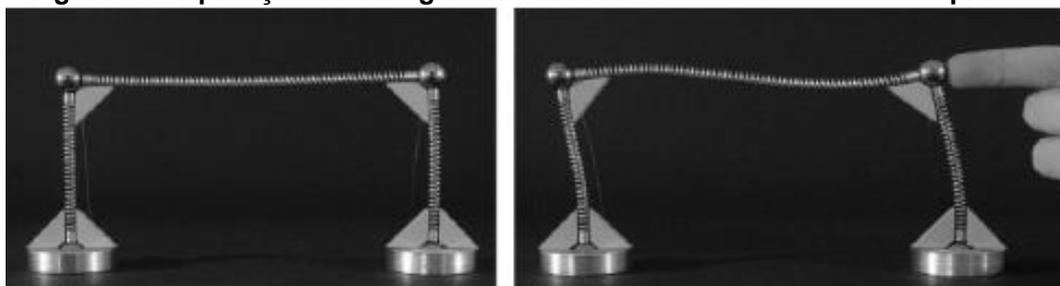
2.2.3 Estudos experimentais realizados com o modelo

Com o propósito de legitimar a eficiência do modelo estrutural Kit Molas como um modelo qualitativo, Oliveira (2008) realizou ensaios experimentais com diferentes sistemas estruturais e comparou os resultados obtidos através de simulação computacional no *software* SAP2000.

Oliveira (2008) montou estruturas planas e espaciais e aplicou manualmente um carregamento padrão em cada uma delas, o que gerou uma

deformada, conforme Figura 18. Após a aplicação do carregamento, as estruturas deformadas foram fotografadas e as imagens digitalizadas para posterior comparação com a simulação computacional.

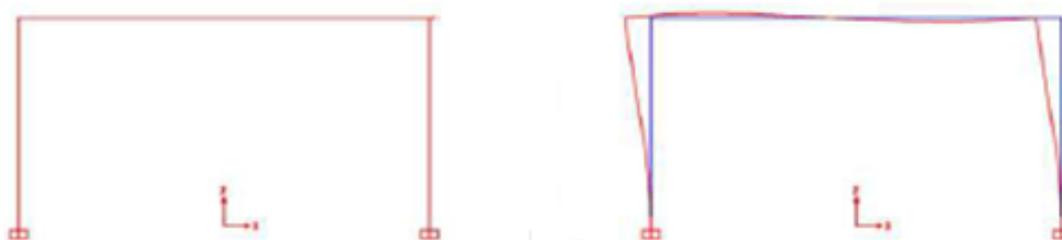
Figura 18 – Aplicação do carregamento manual e deformada do modelo plano



Fonte: Adaptado de Oliveira (2008).

Em paralelo aos ensaios físicos e a digitalização das fotos, Oliveira (2008) realizou a modelagem e a simulação dos mesmos sistemas no *software* SAP2000, Figura 19.

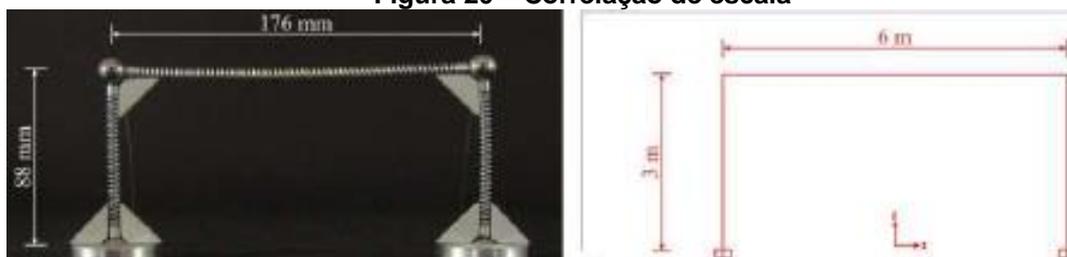
Figura 19 – Simulação no software SAP2000



Fonte: Adaptado de Oliveira (2008).

Para que os resultados se aproximassem ao máximo do real, foi necessário efetuar uma correlação proporcional das dimensões dos elementos do Kit Molas com as dimensões mais comuns de cada sistema em escala real, como pode ser observado na Figura 20.

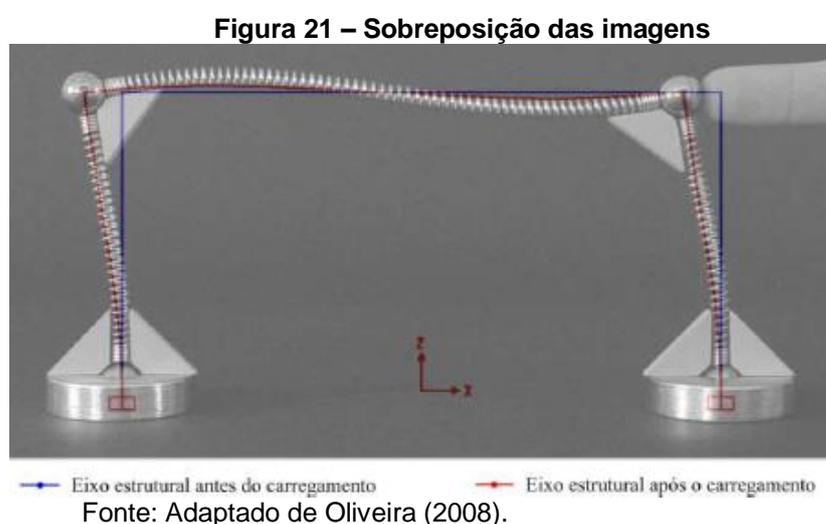
Figura 20 – Correlação de escala



Fonte: Adaptado de Oliveira (2008).

Realizados o ensaio e a simulação computacional, partiu-se para a comparação das imagens, onde as deformadas seriam observadas e a efetividade do modelo seria ou não confirmada.

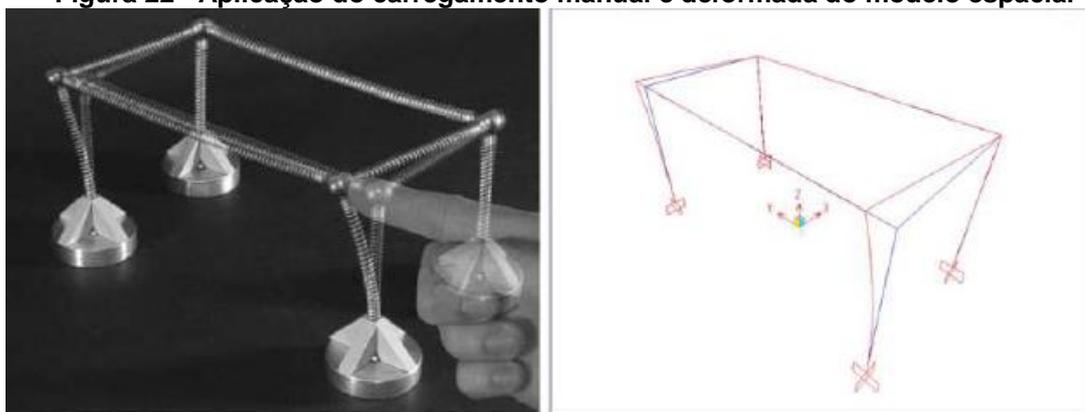
Oliveira (2008) realizou a comparação do comportamento das deformadas através da sobreposição das imagens capturadas durante a aplicação do carregamento manual e durante a simulação no SAP2000. Para tal, o mestrando utilizou o *software* Adobe Photoshop CS (2003), onde conseguiu ajustar a cor, tamanho e posição das imagens, o que possibilitou a exata sobreposição das mesmas, conforme Figura 21.



Oliveira (2008) realizou o mesmo procedimento para as seguintes estruturas planas: coluna, viga, pórtico, viga contínua, arco e treliça, e para as respectivas estruturas espaciais: pórtico espacial e treliça espacial. O autor obteve resultados favoráveis para todas elas quanto ao comportamento das deformadas no âmbito das análises qualitativas. Abaixo encontram-se os procedimentos realizados para as estruturas espaciais.

Assim como para o pórtico plano mostrado anteriormente, Oliveira (2008) submeteu diferentes pórticos espaciais a um carregamento horizontal concentrado aplicado manualmente e observou a deformada dos mesmos. Na Figura 22 encontra-se o primeiro modelo tridimensional estudado.

Figura 22 - Aplicação do carregamento manual e deformada do modelo espacial



Fonte: Adaptado de Oliveira (2008).

Devido à alta distorção que o SAP2000 apresenta para as imagens em três dimensões, não houve a sobreposição das imagens deste tipo de estrutura. Assim, suas deformadas foram analisadas e comparadas separadamente.

Oliveira (2008) observou através da comparação das imagens que a configuração da deformada no Kit Molas é similar a deformada apresentada no *software SAP 2000*. Pode-se observar que no modelo apresentado na Figura 22, apenas os pilares presentes no plano de aplicação do carregamento se deformam, visto que estão engastados na base. As vigas por sua vez, não transmitem momento para o plano oposto, pois encontram-se rotuladas.

O mesmo procedimento foi realizado para as demais estruturas, onde o autor buscou diferentes condições de contorno para os mesmos sistemas estruturais com a finalidade de comparar o comportamento de suas deformadas no modelo com o comportamento das deformadas apresentadas no sistema computacional. Cabe ressaltar novamente que a comparação realizada diz respeito apenas ao comportamento das deformadas, visto que o Kit Molas é um modelo qualitativo e não um modelo reduzido onde suas grandezas podem ser quantificadas e aplicadas em escala real, conforme fundamentado no capítulo 2.1.

2.3 Análise Numérica

Dias (2003) afirma que a análise por meio de métodos numéricos faz parte da rotina dos escritórios, e que tem como objetivo simular matematicamente o

comportamento das estruturas, o que torna o uso dos *softwares* para análise e detalhamento delas indispensável.

No campo das análises numéricas encontra-se o método dos deslocamentos. De acordo com Puel (2009) este método consiste em fazer o equilíbrio de forças em torno dos nós, em cada direção possível de deslocamento do nó (grau de liberdade), sendo os deslocamentos nodais as incógnitas do problema. Determinam inicialmente os deslocamentos e, a partir destes, as reações e os esforços nas barras. O sistema de equações de equilíbrio de forças pode ser escrito matricialmente, conforme a Equação 1 a seguir:

$$[K] \cdot [\delta] = \{F\} \quad (1)$$

Onde $\{F\}$ representa a matriz das ações atuantes na estrutura, $[K]$ a matriz de rigidez da estrutura e $[\delta]$ a matriz de deslocamentos.

A análise de uma estrutura pelo método dos deslocamentos pode ser descrita, matricialmente, pelas seguintes etapas (LORIGGIO, 2000):

- a) Elaboração do modelo da estrutura: escolha do sistema estrutural resistente, comportamento dos componentes da estrutura, vinculações, propriedades dos materiais, dimensões da estrutura, geometria dos componentes, carregamentos e combinações de carregamentos;
- b) Definição e número de nós;
- c) Definição da incidência e numeração das barras;
- d) Cálculo da matriz de rigidez no sistema local $[K_L]$ para todas as barras da estrutura;
- e) Cálculo da matriz de rigidez no sistema global $[K] = [T]^t \cdot [K_L] \cdot [T]$ para todas as barras da estrutura.

Onde $[T]$ é a matriz transformação do eixo global para o eixo local e $[T]^t$ é a matriz transposta de rotação.

- f) Montagem da matriz de rigidez $[K]$ da estrutura;

- g) Determinação do vetor de esforços de imobilização dos nós em cada barra no sistema local $\{S_o\}$;
- h) Determinação do vetor de esforços de imobilização dos nós em cada barra no sistema global $\{S_o\} = [T]^t \cdot \{S_o\}$;
- i) Montagem do vetor de esforços de imobilização dos nós da estrutura $\{F_o\}$;
- j) Montagem do sistema de equação da estrutura em relação aos graus de liberdade originais, conforme Equação 2.

$$[K] \cdot [\delta] = \{F\} - \{F_o\} \quad (2)$$

Onde $[K]$ representa a matriz de rigidez, $\{\delta\}$ o vetor deslocamentos, $\{F\}$ o vetor ações nodais e $\{F_o\}$ o vetor de esforços de imobilização dos nós da estrutura.

- k) Reordenação do sistema de equações, deixando as direções restringidas para o final;
- l) Resolução do sistema de equações $[K_{LL}] \cdot \{\delta_L\} = \{F_L\}$, correspondentes as direções livres;
- m) Separar de $\{\delta_L\}$ os deslocamentos $\{d\}$ de cada barra da estrutura;
- n) Encontrar o vetor de reações de apoio nas direções restringidas;
- o) Calcular os esforços solicitantes nas extremidades das barras no sistema global $\{S\} = [K_G] \cdot \{d\}$. Em seguida, transformam-se os esforços para o sistema local $\{S\}$.

De acordo com Puel (2009) quando todos os deslocamentos, reações de apoio e esforços nas barras tiveram sido obtidos, a análise pode ser considerada como terminada.

Costa (2009) ressalta a importância de que os parâmetros de comportamento dos materiais e seus respectivos modelos constitutivos, utilizados nas simulações numéricas, sejam adequadamente identificados e calibrados, afim de simular corretamente o comportamento estrutural nos *softwares*.

Nesse contexto, será apresentado a seguir o *software* Ftool, programa utilizado na realização das simulações computacionais.

2.3.1 *Software* Ftool

O *software* Ftool (Two-dimensional Frame Analysis Tool) é um programa gráfico-interativo utilizado para o ensino do comportamento das estruturas e foi idealizado pelo professor Luiz Fernando Martha do departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. O programa é direcionado para a análise estrutural de pórticos planos e tem como objetivo principal a prototipagem simples das estruturas (LUIZ FERNANDO MARTHA, 2020).

Inicialmente o Ftool foi pensado com um enfoque educacional, mas logo evoluiu para uma ferramenta profissional, e atualmente é utilizado em projetos executivos de estruturas múltiplas. Hoje tem-se duas versões do *software*, uma versão básica e gratuita e uma versão avançada, com licença comercial, a qual atende de forma mais adequada as necessidades dos projetistas de estruturas (LUIZ FERNANDO MARTHA, 2020).

Luiz Fernando Martha (2020) explica que o Ftool analisa os modelos estruturais fornecendo ao usuário tanto resultados simples, como diagramas de esforços internos e deformadas, quanto linhas de influências em qualquer ponto da estrutural. O *software* permite que se defina as seções transversais dos elementos e os apoios, que podem ser rígidos ou elásticos, podendo ser ainda rotacionados ou aceitar deslocamentos impostos.

2.4 Estabilidade Global

Barbosa (2016) entende estabilidade global como a capacidade que uma determinada estrutura tem em transferir os efeitos de segunda ordem, a ação do vento e o desaprumo para as fundações sem comprometer a segurança da edificação.

Em estruturas de concreto armado a atuação simultânea de ações verticais e horizontais ocasiona deslocamentos horizontais na estrutura, gerando esforços locais e globais de segunda ordem. Os esforços globais são gerados pelos deslocamentos dos nós da estrutura, enquanto que os esforços locais estão

relacionados a falta de retilineidade nos eixos dos elementos estruturais (JORDÃO, 2003).

Segundo Moncayo (2011) a verificação da estabilidade global de uma estrutura em concreto armado é um requisito indispensável na elaboração de projetos e tem como objetivo garantir a segurança da estrutura diante do estado limite último de instabilidade, situação causada pelo aumento das deformações e que representa a perda de capacidade resistente da estrutura.

De acordo com a ABNT (2014) todas as estruturas são deslocáveis, no entanto podemos dividi-las em estruturas de nós fixo e estruturas de nós móveis:

- a) As estruturas de nós fixos são aquelas onde os deslocamentos horizontais dos nós são pequenos e os efeitos globais de 2ª ordem podem ser desconsiderados, pois representam menos que 10% do valor dos esforços de 1ª ordem (JORDÃO, 2003).
- b) As estruturas de nós móveis são aquelas onde os deslocamentos horizontais dos nós são pequenos e os efeitos globais de 2ª se tornam importantes, uma vez que representam mais que 10% do valor dos esforços de 1ª ordem (JORDÃO, 2003).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) indica os parâmetros de instabilidade α e o coeficiente γ_z para a classificação de estruturas como de nós fixos ou móveis, conforme apresentado nos itens a seguir.

2.4.1 Parâmetro de Instabilidade α

Jordão (2003) afirma que o parâmetro de instabilidade α foi idealizado por Beck e Koing (1966). Este dado é baseado na teoria de Euler e é utilizado para avaliar a necessidade de consideração dos efeitos de segunda ordem por meio da rigidez horizontal da estrutura (BUENO, 2009). De acordo com NBR 6118 (ABNT, 2014) uma estrutura pode ser considerada de nós fixos quando α for menor que α_1 , dado pela Equação 3 a seguir:

$$\alpha = H_{tot} \sqrt{\frac{N_k}{E_{CS} I_c}} \quad (3)$$

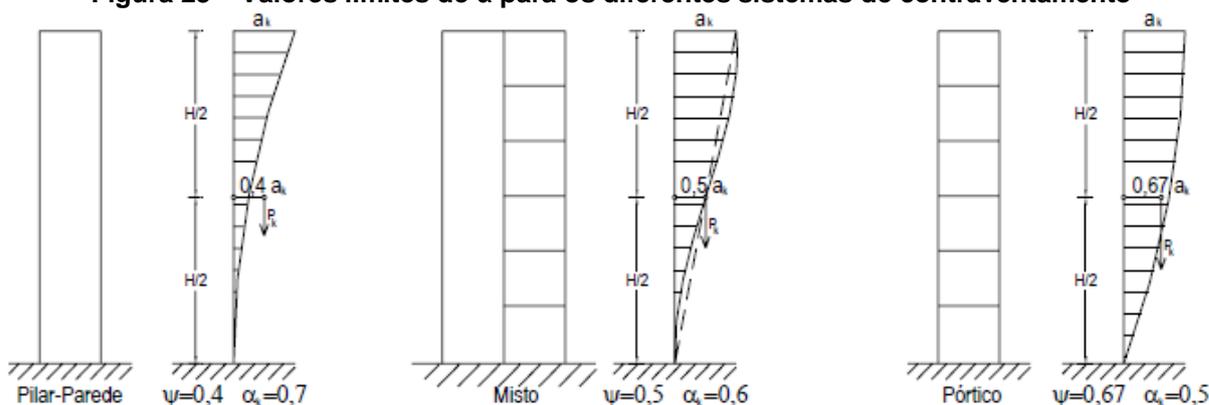
$\alpha_1 = 0,2 + 0,1n$, quando $n \leq 3$

$\alpha_1 = 0,6$, quando $n \geq 4$

Onde H_{tot} representa a altura total do edifício, N_k o somatório das ações verticais atuantes, $E_{CS} I_c$ o somatório dos valores de rigidez de todos os pilares na direção considerada e n o número de pavimentos acima do subsolo.

Segundo Franco (1985) citado por Jordão (2003) o valor limite de α depende do sistema de contraventamento utilizado na estrutura, de acordo com o autor quando se utiliza pilares-parede $\alpha_{lim} = 0,7$, quando se utiliza associações $\alpha_{lim} = 0,6$ e por fim, quando se utiliza pórticos o valor de α_{lim} é 0,5, conforme Figura 23.

Figura 23 – Valores limites de α para os diferentes sistemas de contraventamento



Conforme cita Wordell (2003) em sua dissertação esse parâmetro possui o objetivo de fornecer ao projetista informações a respeito da sensibilidade da estrutura aos efeitos de segunda ordem, informando a ele a necessidade ou não de considerá-los.

2.4.2 Coeficiente γ_z

O coeficiente γ_z é um parâmetro, criado por Franco e Vasconcelos (1991), que avalia a estabilidade global de edifícios em concreto armado de no mínimo quatro

pavimentos e possui ainda a capacidade de estimar esforços de segunda ordem por meio da majoração dos efeitos de primeira ordem (MONCAYO, 2011).

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) o coeficiente γ_z pode ser determinado a partir dos resultados de uma análise linear de primeira ordem. O valor de γ_z é obtido através da Equação 4, descrita abaixo.

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (4)$$

Onde $\Delta M_{tot,d}$ diz respeito a soma dos produtos das forças verticais atuantes na estrutura, na combinação considerada, com seus valores de cálculo, por seus respectivos deslocamentos horizontais, enquanto que $M_{1,tot,d}$ corresponde ao momento de tombamento da estrutura, ou seja, a soma dos momentos de todas as forças horizontais da combinação considerada, com seus valores de cálculo, em relação à base da estrutura.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) uma estrutura é considerada de nós fixos quando a condição $\gamma_z \leq 1,1$ for obedecida, ou seja, quando os esforços de segunda ordem forem inferiores a 10% dos esforços de primeira ordem.

Moncayo (2011) afirma que valores coerentes de γ_z são número um pouco maiores que 1,0. Para Franco e Vasconcelos (1991) o limite do coeficiente γ_z é 1,20, enquanto que para Carmo (1995) pode-se avançar até valores de até 1,30. Assim, a NBR 6118 (ABNT, 2014) determina o valor limite de 1,30 para o coeficiente γ_z . Segundo a norma, valores acima de 1,30 revelam que a estrutura possui um grau de instabilidade elevado e são impraticáveis e valores inferiores a 1,0, ou até mesmo negativos, mostram-se incoerentes e apontam que a estrutura é totalmente instável.

De acordo com Campoó, Corrêa e Ramalho (2005) o parâmetro γ_z mostra-se satisfatório como fator de majoração dos efeitos de primeira ordem para obter-se os de segunda. Quando comparado ao parâmetro α , os autores concluíram ambos se correlacionam, no entanto afirmam que há maior vantagem em utilizar o coeficiente γ_z , visto que este permite estimar os esforços finais, que incluem os de segunda ordem

com maior precisão. Dessa maneira, no presente estudo será abordado o coeficiente γ_z .

2.5 Ações Atuantes nas Estruturas

Segundo a NBR 8681 (ABNT, 2003), as ações são causas que provocam esforços ou deformações nas estruturas. De uma maneira prática, as deformações impostas à estrutura são designadas como ações indiretas, enquanto que as forças, são denominadas ações diretas (ABNT, 2003).

De acordo com NBR 6118 (ABNT, 2014) na análise estrutural deve-se considerar todas as ações atuantes que possam gerar algum efeito significativo na segurança da estrutura analisada. Conforme a NBR 8681 (ABNT, 2003) as ações são classificadas como permanentes, variáveis e excepcionais.

2.5.1 Ações Permanentes

Segundo a descrição da NBR 6118 (ABNT, 2014) as ações permanentes são aquelas que mantêm seu valor praticamente constante durante toda a vida útil da edificação e aquelas que aumentam no decorrer do tempo e tendem a um valor-limite constante. Essas ações devem ser consideradas com seus valores mais desfavoráveis, presando-se assim pela segurança.

As ações permanentes são classificadas em permanentes diretas e permanentes indiretas.

As ações permanentes diretas são constituídas pelo peso próprio da estrutura, pelo peso dos elementos construtivos fixos, das instalações fixas e dos empuxos permanentes.

Já as ações permanentes indiretas são constituídas pelas deformações causadas pela retração e pela fluência do concreto, pelo deslocamento dos apoios, por imperfeições geométricas e pela protensão.

2.5.2 Ações Variáveis

As ações variáveis, segundo a NBR 8682 (ABNT, 2003), correspondem aos carregamentos que podem ou não ser impostos na estrutura durante a sua vida útil ou de construção, como por exemplo a sobrecarga de utilização, variações de temperatura, pressão hidrostática ou hidrodinâmicas, forças de impacto e o efeito do vento. As ações variáveis são classificadas em normais ou especiais, de acordo com a possibilidade de ocorrer durante a vida da estrutura.

Para a NBR 8682 (ABNT, 2003) as ações variáveis normais possuem grande possibilidade de acontecer na estrutura, desta forma os projetistas têm como obrigação considera-las no projeto das estruturas.

Já as ações variáveis especiais são aquelas consideradas para situações especiais tais como, ações sísmicas e cargas acidentais (ABNT, 2003).

2.5.2.1 Ações do Vento

Conforme citado anteriormente no item 2.5.2, as ações do vento são classificadas como ações variáveis normais. Camiccia (2017) afirma que as ações do vento dependem de dois aspectos: aerodinâmicos e meteorológicos.

Os aspectos aerodinâmicos são aqueles relacionados a análise do vento levando em conta a forma da edificação, visto que o vento ao incidir em uma edificação terá diferentes comportamentos em função do seu formato (GONÇALVES, 2007).

Enquanto que, os aspectos meteorológicos são responsáveis pela velocidade do vento que se deve considerar no projeto estrutural de uma edificação. Esses aspectos são avaliados a partir do local da edificação, do tipo de terreno, da altura da edificação, da rugosidade do terreno e do tipo de ocupação (CAMICIA, 2017).

De acordo com a NBR 6123 (ABNT, 1988) a pressão causada pelo vento pode ser obtida através da Equação 6.

$$q_{vento} = 0,613 * V k^2 \quad (6)$$

Figura 25 – Valores mínimos do fator estatístico S_3

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

Fonte: Adaptado NBR 6123 (ABNT, 1988).

O fator S_2 depende ainda de alguns outros fatores e pode ser obtido a partir da Equação 8 apresentada abaixo.

$$S_2 = b * F_r * \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (8)$$

Onde z representa o nível do pavimento e b , F_r e p são parâmetros meteorológicos e que podem ser encontrados na Figura 26, figura correspondente a Tabela 1 da NBR 6123 (ABNT, 1988).

Vale que ressaltar que, ainda de acordo com a norma citada, o fator rajada F_r é sempre correspondente a categoria II.

Figura 26 – Parâmetros meteorológicos

Categoria	z_p (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		F_r	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Fonte: Adaptado NBR 6123 (ABNT, 1988).

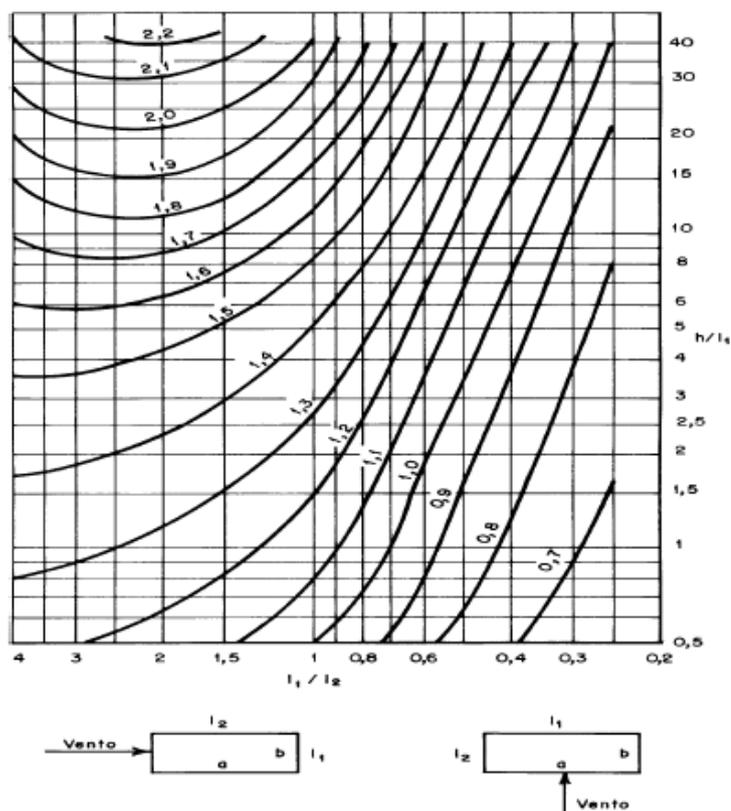
Onde a categoria é definida em função da rugosidade do terreno e classifica-se em cinco categorias distintas e a classe é definida em conformidade com as dimensões da edificação em estudo, podendo ela ser Classe A, B ou C (ABNT, 1988).

Após a obtenção da pressão de obstrução, a NBR 6123 (ABNT, 1988) indica que se calcule a força de arrasto, dada pela Equação 9.

$$F_a = q_i * A_e * C_a \quad (9)$$

Onde A_e representa a área efetiva da edificação ou área de sombra, determinada em m^2 , e C_a o coeficiente de arrasto, dado em função das dimensões e da altura da edificação, o qual pode ser obtido na Figura 27.

Figura 27 – Coeficiente de arrasto



Fonte: Adaptado NBR 6123 (ABNT, 1988).

2.6 Contraventamentos

Contraventamentos são elementos adicionados às estruturas com a função de reduzir ou impedir os deslocamentos horizontais e fornecer estabilidade às edificações que sofrem com a ação dos ventos. Estes elementos podem ser utilizados na vertical, por meio do travamento de vigas e pilares, ou na horizontal, através do travamento de coberturas (MATOS, 2014). Autores como Bastos (2005) consideram que as estruturas convencionais de contraventamento são constituídas por elementos de grandes dimensões, os quais proporcionam grande inércia à edificação, como por exemplo, pilares-parede, paredes estruturais, treliças, pórticos rígidos, núcleos estruturais e outros.

De acordo com Matos (2014) os contraventamentos são justificáveis e necessários em estruturas de nós móveis, ou que sofram grandes deslocamentos laterais, ou ainda se os efeitos de segunda ordem não puderem ser desprezados. Pereira (2000) aponta que há grande variabilidade no efeito das ações horizontais e que as mesmas aumentam rapidamente à medida que as alturas das edificações aumentam. Assim, quanto mais alto e mais esbelto o edifício maiores tendem a ser os deslocamentos e maior o comprometimento da estabilidade global da estrutura. De acordo com o autor os sistemas de contraventamento são os principais responsáveis por conferir segurança as estruturas tridimensionais de edifícios altos.

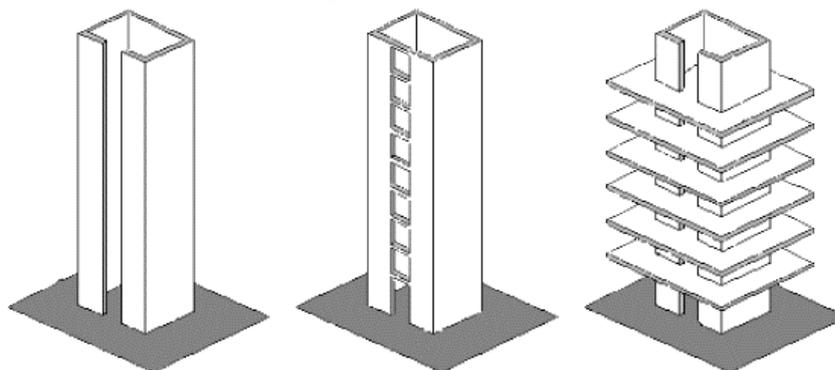
Assim, pode-se citar elementos como os contraventamentos treliçados, núcleos ou paredes estruturais, estruturas tubulares, barras diagonais e *outrigger* como alguns dos elementos que possuem a função de conferir maior estabilidade as estruturas.

2.6.1 Núcleos estruturais

Os núcleos estruturais ou resistentes são elementos de elevada rigidez, formados pela associação de paredes retas ou curvas, que formam seções transversais abertas ou semifechadas (MATIAS, 1997). Este sistema consiste em preencher vãos de estruturas em concreto armado ou aço com alvenaria em bloco cerâmico ou concreto armado (CHAVES, 2009). Franca (2003) afirma que esse sistema consiste na utilização de grandes núcleos de concreto, os quais possuem

rigidez elevada, e podem trabalhar isoladamente ou em conjunto com os demais pórticos rígidos da estrutura. Estes sistemas normalmente são utilizados nas áreas centrais do edifício, tais como no entorno da escada, do elevador, em depósitos ou locais reservados para instalações elétricas ou hidráulica (PEREIRA, 2000), como pode-se observar na Figura 28.

Figura 28 – Núcleo estrutural



Fonte: Adaptado de Smith & Coull (1991) citado por Pereira (2000).

Esses sistemas possuem dimensões superiores aos dos demais elementos normalmente utilizados para o contraventamentos das estruturas, sendo assim, sua rigidez a flexão é responsável por grande parte da estabilidade global das edificações (MATIAS, 1997). São muito comuns em edifícios que possuem na faixa de 20 a 35 pavimentos, visto que sua alta rigidez lateral possibilita as construções altas e esbeltas até mesmo quando a contribuição dos pórticos na estabilidade da estrutura é pequena (FRANCA, 2003)

Os núcleos rígidos comportam-se como vigas em balanço engastadas na fundação, desta maneira deformam-se principalmente devido a flexão e com pequena contribuição do modo de corte (FRANCA, 2003). Ainda de acordo com o autor, a combinação dos núcleos estruturais com pórticos rígidos é extremamente interessante para a estrutura do ponto de vista da estabilidade global. Visto que, os pórticos de concreto tendem a se deformar em uma configuração de corte, e a sua combinação com os núcleos de concreto resultam em uma interação extremamente conveniente, gerando em ambos uma deformação comum, o que resulta em um esqueleto mais rígido e com deslocamentos menores, principalmente no topo da estrutura.

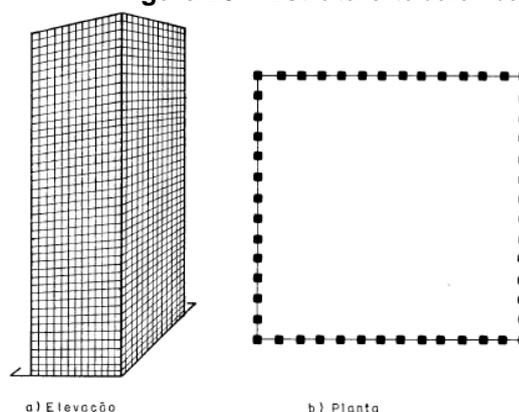
De acordo com Matias (1997) o que distingue o núcleo resistente dos demais elementos da estrutura é a capacidade que o mesmo tem de evitar o

empenamento, fenômeno que consiste no deslocamento na direção longitudinal da seção causado pela sua própria rotação em torno do seu centro de torção. A sua eficiência está diretamente ligada a localização do núcleo em planta, estes elementos quando dispostos simetricamente e na periferia da estrutura aumentam a eficiência da resistência a esforços horizontais e de torção (CHAVES, 2009).

2.6.2 Estruturas Tubulares

De acordo com Fakury (1986), as estruturas tubulares aplicam-se a edifícios com plantas quadradas ou retangulares, sendo formados por dois pares de pórticos ortogonalmente dispostos nas faces periféricas das estruturas e ligados por pilares de canto, Figura 29. Esse sistema de contraventamento foi utilizado pela primeira vez em 1961 no edifício residencial, De Witt-Chestnut, de 43 pavimentos localizado na cidade de Chicago. Desde então o sistema vem sendo aperfeiçoado e já foi utilizado em edifícios de até 110 pavimentos, como por exemplo o World Trade Center, localizado em Nova Iorque.

Figura 29 – Estrutura tubular básica



Fonte: Adaptado de Fakury (1986).

Além das estruturas tubulares aporticadas, tem-se as treliçadas, as quais são bastante eficientes e apresentam maior potencial para estruturas mais altas quando comparadas as primeiras. No sistema treliçado os pilares possuem maior espaçamento, possibilitando maiores aberturas para portas e janelas. Além disso, as estruturas tubulares treliçadas contribuem para a distribuição da carga gravitacional entre os pilares, dividindo os carregamentos axiais dos elementos mais solicitados para os menos solicitados (FRANCA, 2003).

Franca (2003) afirma que, no sistema de estruturas tubulares os pilares e as vigas externas formam um conjunto que funciona como um tubo em balanço, o qual é engastado na fundação. Neste sistema os pórticos são trazidos para as faces externas do edifício por toda altura e perímetro da edificação, obtendo-se ao final um grande tubo altamente resistente à flexão e à torção. Nas estruturas tubulares as cargas gravitacionais são geralmente compartilhadas entre os pilares interiores e exteriores, enquanto que o carregamento lateral é absorvido pelas vigas e pilares situados no perímetro da edificação. Quando submetidas a ação do carregamento lateral, as paredes externas do tubo agem como a alma de uma viga, quando estão na mesma direção do carregamento, e como flanges, quando estão perpendiculares ao carregamento (FRANCA, 2003).

Apesar de o sistema ter sido desenvolvido para estruturas retangulares e quadradas, as estruturas tubulares comportam-se satisfatoriamente para plantas triangulares e circulares. Também podem ser utilizadas tanto em estruturas de concreto armado quanto em estruturas em aço (FRANCA, 2003).

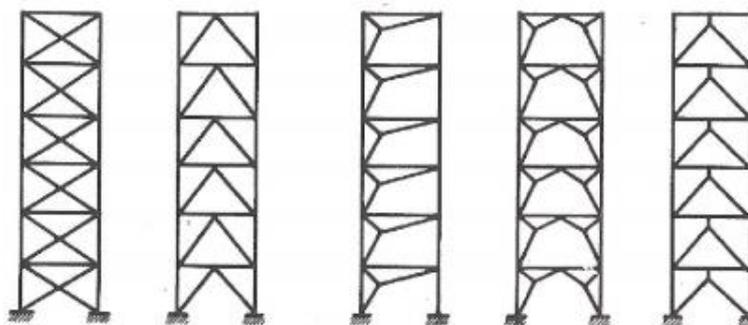
2.6.3 Contraventamentos Trelaçados

As estruturas contraventadas apresentam comportamento muito mais eficiente em relação as estruturas exclusivamente aporricadas, em virtude da eliminação dos momentos nas ligações entre as vigas e os pilares. Uma maneira de se alcançar a extinção dos momentos é a inclusão de barras diagonais no interior dos pórticos (FRANCA, 2003).

De acordo com Dias (2004) as diagonais predem os pórticos de um nó ao outro, e conseqüentemente aumentam sua rigidez e os tornam indeslocáveis. As mesmas são feitas em concreto armado ou em material metálico, sendo mais eficaz quando constituídas deste último, uma vez que resistem melhor a esforços de compressão e tração. Quando executadas em concreto armado, necessitam de uma equipe extremamente eficiente e especializada, visto que o trabalho de concretar peças na diagonal e que sejam ligas de um nó ao outro da estrutura não é uma tarefa trivial.

Dias (2004) apresenta algumas tipologias de contraventamento para o enrijecimento de pórticos, podendo ser eles com apenas uma diagonal, com duas diagonais, do tipo “X”, “V”, “K”, “ou ainda “Y”, conforme Figura 30.

Figura 30 – Pórticos treliçados



Fonte: Adaptado de Chaves (2009).

As barras diagonais formam pórticos reticulados e conferem resistência as forças laterais e compõem uma rede de treliças verticais (CHAVES, 2009). Tais pórticos não precisam, necessariamente, estar lado a lado, contudo devem estar na mesma direção, então podem ser colocadas ao longo de toda a altura do edifício logo, podem ser utilizados na fachada da edificação (DIAS, 2004).

2.6.4 Parede Estrutural

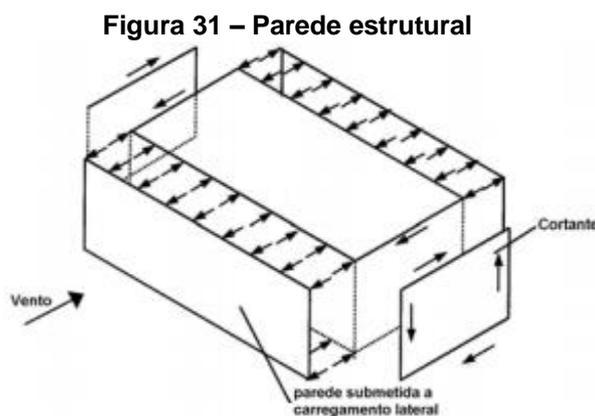
De acordo com Chaves (2009) as paredes estruturais podem servir tanto arquitetonicamente, fazendo o papel de elementos de vedação ou partições internas, quanto como elemento estrutural, uma vez que suportam cargas laterais e cargas de gravidade.

Camargo (2012) afirma que essas paredes podem ser de concreto armado ou de alvenaria estrutural. E de acordo com Franca (2003), podem ser ainda paredes constituídas de aço com espessuras entre 10 e 32 centímetros, visto que se comportam de forma semelhante aos sistemas de concreto armado, apresentando bons resultados quando associadas a pórticos rígidos.

O conceito das paredes estruturais está relacionado a ideia de ocupar os vãos de uma estrutura com concreto armado, fazendo com que elas se comportem como bielas comprimidas e tracionadas, quando submetida a esforços laterais (CHAVES, 2009). Santos (2015) afirma que esse sistema apresenta elevada rigidez,

assumindo assim a função de contraventar a estrutura, visto que absorve praticamente todos os esforços horizontais, aplicados à estrutura.

Segundo Franca (2003) as paredes estruturais, Figura 31, comportam-se como se fossem treliças verticais de um pórtico contraventado, conferindo ao edifício grande resistência lateral.



Camargo (2012) ressalta algumas desvantagens desse sistema, como por exemplo a perda de flexibilidade na circulação interna e de recursos arquitetônicos nas fachadas e a dificuldade em compatibilizar a construção da parede com a montagem da estrutura.

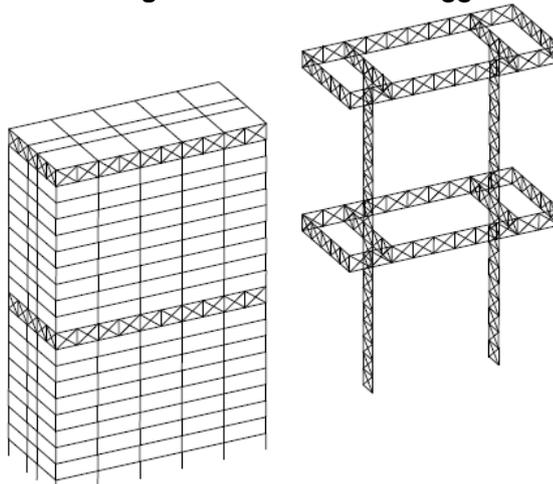
Segundo Smith e Coull (1991) citados por Camargo (2012), em edifícios altos essas as espessuras das paredes estruturais podem variar ao longo do seu comprimento. No entanto, essas variações devem ser feitas de forma cautelosa devido a distribuição de momentos e de forças de cisalhamento entre os painéis. Outro ponto que deve ser considerado é o posicionamento do sistema, uma vez que isto influencia diretamente na distribuição dos esforços no pavimento, visto que a disposição assimétrica e a diferença de inércia dos elementos, podem causar torção na estrutura (SANTOS, 2015).

2.6.5 Outrigger

As estruturas com treliças transversais levam o nome de sistema estrutural Outrigger, o qual consistem na utilização de treliças horizontais, conforme Figura 32.

Os Outrigger têm como função conectar as colunas de um mesmo pavimento, conferindo um aumento significativo de rigidez lateral à estrutura (CHAVES, 2009). Este tipo de contraventamento é indicado para edificações que possuam uma grande relação entre altura e largura (CAMARGO, 2012).

Figura 32 – Sistema *Outrigger*



Fonte: Adaptado de Camargo (2012).

De acordo com Smth e Coull (199) citado por Camargo (2012) este sistema tem como característica influenciar no aumento da rigidez lateral, no entanto a medida que se acrescenta mais Outrigger à estrutura, a rigidez lateral diminui, desta forma é indicado que se faça uso de um número máximo de quatro ou cinco elementos em uma mesma edificação.

Engel (2002) afirma que a efetividade do sistema está relacionada à altura da edificação. O autor indica que para atingir-se a eficiência máxima do Outrigger deve-se instalá-lo a $3/5$ da extensão vertical total da estrutura. Já Camargo (2012) indica que se utilize duas linhas do sistema, sendo uma no topo da edificação e a outra na metade da mesma.

O sistema apresenta duas grandes vantagens, a primeira diz respeito ao espaçamento das colunas exteriores não serem restritos as condições estruturais, mas sim as estéticas e funcionais da edificação. A segunda está relacionada a questão econômica, visto que é dispensável a utilização de ligações rígidas entres os elementos estruturais, desta forma há uma economia considerável em relação as ligações (CTBUH, 1995).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com Gil (2008) para que um conhecimento seja considerado científico é necessário identificar as operações mentais, as técnicas e materiais que possibilitam a sua verificação. Prodanov e Freitas (2013) afirmam que determinar o método de uma pesquisa possibilita chegar ao conhecimento esperado.

O método científico é definido como o conjunto de processos e operações mentais que devem ser empregados na pesquisa afim de chegar ao objetivo final. Os métodos concedem as bases lógicas à investigação (PRODANOV; FREITAS, 2013), detecta erros e auxilia a decisão de outros pesquisadores (MARCONI; LAKATOS, 2003).

Além dos métodos é de extrema importância a definição dos materiais que serão utilizados em uma pesquisa, para que as fases da mesma se processem normalmente e possibilitem que outros pesquisadores realizem estudos semelhantes (MARCONI; LAKATOS, 2003). Nesse contexto, a seguir serão apresentados os materiais e os métodos utilizados para o desenvolvimento do atual estudo.

3.1 Materiais

Para elaborar uma pesquisa de qualquer natureza se deve, juntamente com a escolha do assunto, fazer um projeto. O mesmo garante a execução da pesquisa, prevê os materiais, recursos humanos e o tempo necessário para a realização da mesma. Assim, neste capítulo serão apresentados os materiais empregados para a elaboração deste trabalho de conclusão de curso, bem como suas características e particularidades.

3.1.1 Kit Estrutural Molas

Para a montagem e análise dos pórticos espaciais de múltiplos pavimentos do presente estudo utilizou-se quatro Kits Estrutural Molas 1 e três Kits Estrutural Molas 2, os quais estavam disponíveis na instituição solicitante deste trabalho.

Não se fez necessário o uso de Kits Molas 3 em virtude das peças que o compõe. Como mencionado anteriormente, no item 2.2.2, as peças que fazem parte dessas coleções permitem a montagem de estruturas de cabo, as quais não foram contempladas neste trabalho de conclusão de curso.

A necessidade em utilizar quatro Kits Molas 1 e três Kits Molas 2 deveu-se à altura dos modelos e ao número de peças, as quais são indispensáveis para a montagem das estruturas porticadas que serão apresentadas a seguir.

3.1.2 Ftool

Com base em estudos semelhantes já desenvolvidos, optou-se pelo uso do *software* Ftool na elaboração deste trabalho de conclusão de curso.

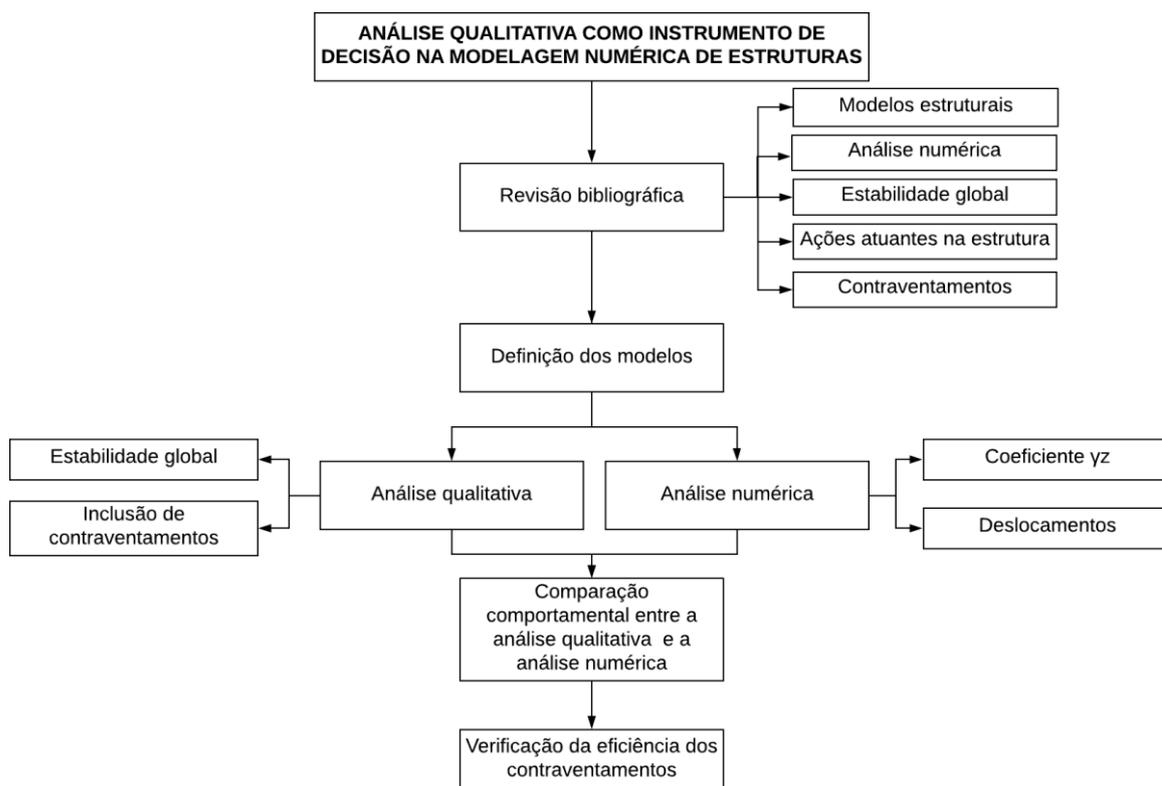
Utilizou-se a versão básica gratuita do programa, uma vez que, esta atende as necessidades impostas por esta pesquisa, possibilitando a modelagem das estruturas, alternância no tipo de ligações entre os elementos estruturais, o tipo de apoio utilizado na fundação e as propriedades dos materiais definidos para a elaboração deste estudo.

Foram modeladas estruturas semelhantes às construídas no Kit Molas afim de, verificar o comportamento estrutural dos modelos na análise numérica (*software* Ftool) e por fim, relacioná-los com a análise qualitativa (obtida pelo Kit Molas).

3.2 Método

Segundo Gil (1999) citado por Silva e Menezes (2005) a investigação científica depende de procedimentos intelectuais e técnicos para que seu objetivo seja atingido. De acordo com as autoras, o método é um conjunto de processos e operações mentais que devem ser seguidos durante um estudo. Para Prodanov e Freitas (2013) o método consiste na linha de raciocínio empregada no processo de pesquisa. Dessa forma, a seguir serão apresentadas as etapas do método aplicado para atingir o objetivo deste estudo, assim como o fluxograma na Figura 33.

Figura 33 – Fluxograma



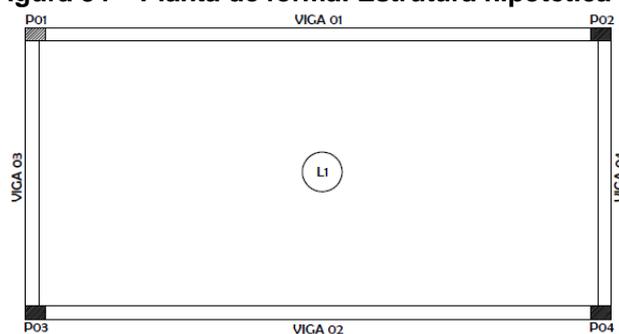
Fonte: Elaboração própria (2020).

3.2.1 Definição dos modelos

A etapa de definição dos modelos iniciou-se a partir da determinação dos modelos teóricos, onde foram escolhidos fundamentados no objetivo de analisar o comportamento estrutural antes e após a inclusão dos contraventamentos, primeiramente nas análises qualitativas e posteriormente nas análises numéricas.

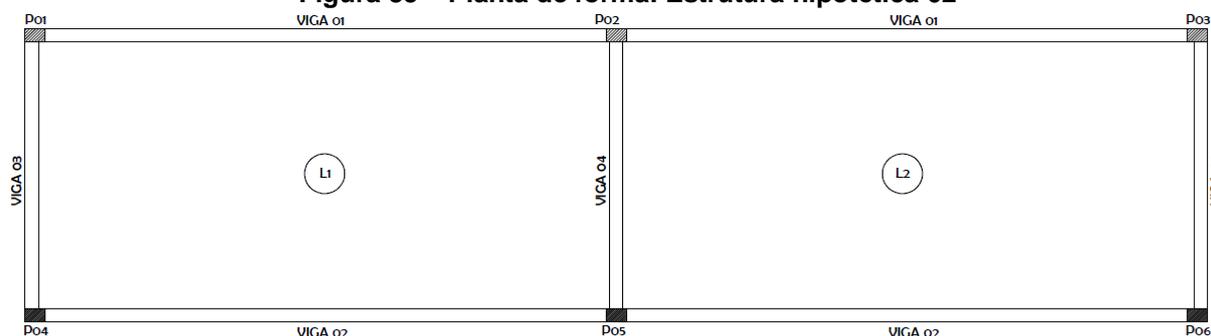
Adotaram-se duas estruturas hipotéticas distintas para a realização do estudo, Estrutura hipotética 01 e Estrutura hipotética 02, apresentadas nas Figura 34 e Figura 35, as quais são formadas respectivamente por, quatro pilares e quatro vigas e por seis pilares e cinco vigas.

Figura 34 – Planta de forma: Estrutura hipotética 01



Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 35 – Planta de forma: Estrutura hipotética 02



Fonte: Elaboração própria (2020).

Após a definição das estruturas hipotéticas, iniciou-se a montagem dos modelos, primeiramente por estruturas sem nenhum tipo de contraventamento e posteriormente foi acrescentando-se diferentes arranjos a fim de verificar o novo comportamento estrutural.

Definiram-se que seriam construídos modelos sem contraventamento, com contraventamento contínuo treliçado do tipo X, com contraventamento alternado treliçado do tipo X e com parede estrutural. A determinação dos modelos deve-se as possibilidades de sistemas estruturais e de contraventamento que se pode montar a partir das peças disponíveis no Kit Molas.

Montaram-se os protótipos, Estrutura hipotética 01 e Estrutura hipotética 02, alternando a vinculação entre os elementos estruturais e o tipo de fundação, com o intuito de verificar o comportamento da deformada de cada estrutura. Desta forma, quatro situações com condições de contorno distintas foram criadas para cada uma das estruturas e em cada uma delas montaram-se os quatro modelos, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Condições de contorno e modelos

Condição de contorno		Modelo	Descrição
A	Base e elementos engastados	1	Sem contraventamento
		2	Contraventamento contínuo em X
		3	Contraventamento alternado em X
		4	Contraventamento com parede estrutural
B	Base engastada e elementos rotulados	1	Sem contraventamento
		2	Contraventamento contínuo em X
		3	Contraventamento alternado em X
		4	Contraventamento com parede estrutural
C	Base rotulada e elementos engastados	1	Sem contraventamento
		2	Contraventamento contínuo em X
		3	Contraventamento alternado em X
		4	Contraventamento com parede estrutural
D	Base e elementos rotulados	1	Sem contraventamento
		2	Contraventamento contínuo em X
		3	Contraventamento alternado em X
		4	Contraventamento com parede estrutural

Fonte: Elaboraões própria (2020).

3.2.2 Concepção dos modelos qualitativos

A concepção dos modelos qualitativos iniciou-se por estruturas de um pavimento e continuou-se até que se atingisse a perda do equilíbrio do protótipo, representada pela altura máxima do modelo. Após isso, incluíram-se diferentes arranjos de contraventamentos e desta forma, o comportamento da estrutura foi reavaliado.

Num primeiro momento teve-se como objetivo observar o efeito das cargas verticais somente resultante do peso próprio dos elementos do Kit Molas utilizados na montagem da estrutura. Desta forma, aumentam na medida em que se aumenta o número de pavimentos do protótipo.

A seguir serão apresentados os protótipos montados com o auxílio do Kit Molas em cada uma das situações descritas na Tabela 1, os quais são submetidos apenas à carregamentos verticais.

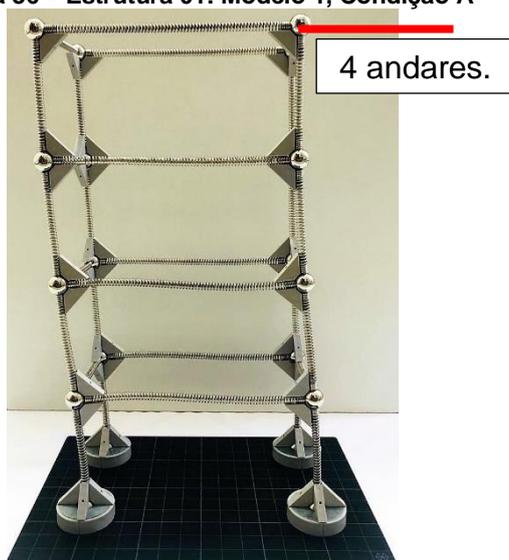
3.2.2.1 Estrutura hipotética 01

A estrutura hipotética 01 consiste em um pórtico espacial formado por quatro pilares, quatro vigas e com a quantidade de andares permitida em cada situação. A seguir serão apresentadas as figuras dos modelos construídos, onde é possível observar, a alternância das ligações entre os elementos estruturais, o tipo de apoio utilizado na fundação e o reflexo disto no comportamento estrutural.

a) Modelo 1 – Sem contraventamento:

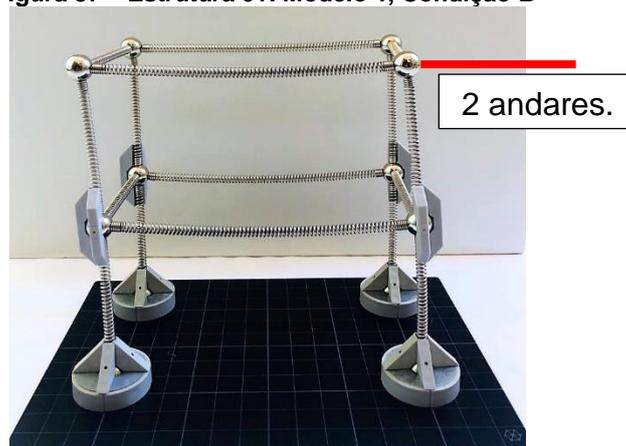
Abaixo encontram-se as Figura 36, Figura 37, Figura 38 e Figura 39, as quais representam uma estrutura sem nenhum tipo de contraventamento. As mesmas possuem o número de pavimentos limitados pelas condições de estabilidade dos seus respectivos pórticos e podem ser identificados nas figuras a seguir.

Figura 36 – Estrutura 01: Modelo 1, Condição A



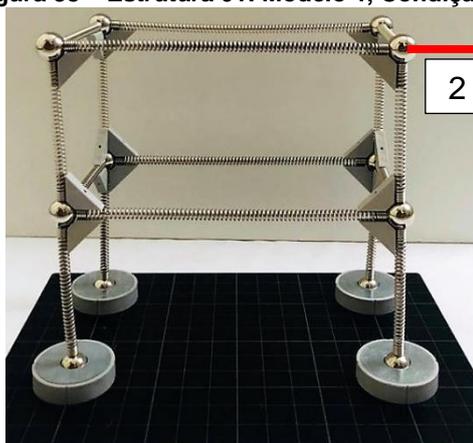
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 37 – Estrutura 01: Modelo 1, Condição B



Fonte: Elaboração própria (2020).

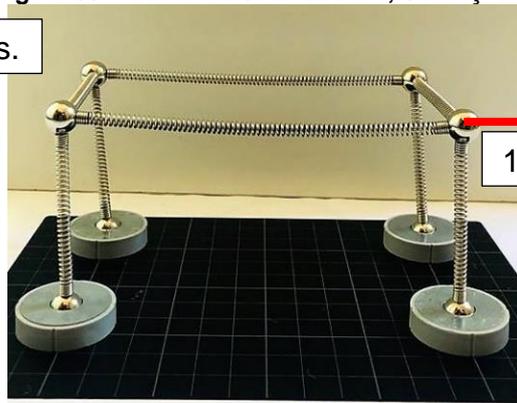
Figura 38 – Estrutura 01: Modelo 1, Condição C



2 andares.

Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 39 – Estrutura 01: Modelo 1, Condição D



1 andar.

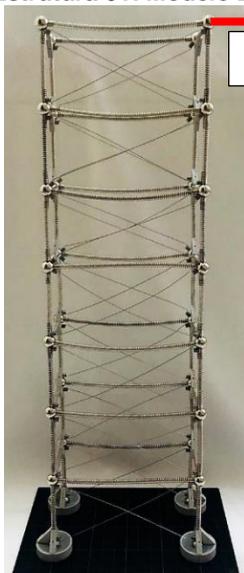
Fonte: Elaboração própria (2020).

Durante a montagem dos modelos pode-se observar a importância das ligações rígidas, uma vez que estas conferem aos modelos maior estabilidade, interferindo no número de pavimentos das estruturas e também na deformada apresentada por elas.

b) Modelo 2 – Contraventamento contínuo em X:

A seguir tem-se as Figura 40, Figura 41, Figura 42 e Figura 43, estas representam uma estrutura com contraventamento treliçado contínuo do tipo X.

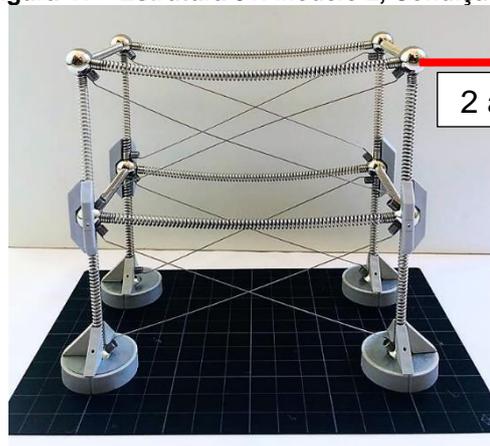
Figura 40 – Estrutura 01: Modelo 2, Condição A



7 andares.

Fonte: Elaboração própria (2020).

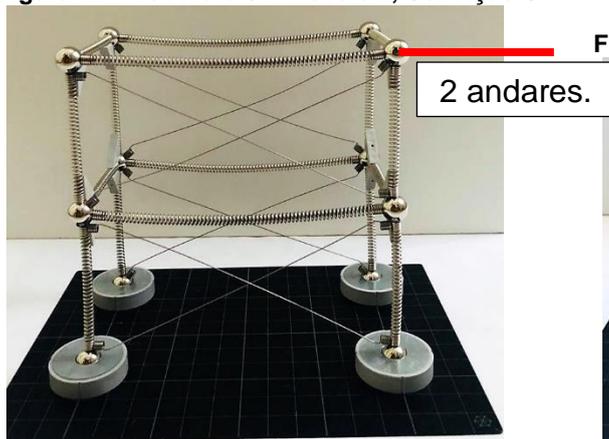
Figura 41 – Estrutura 01: Modelo 2, Condição B



2 andares.

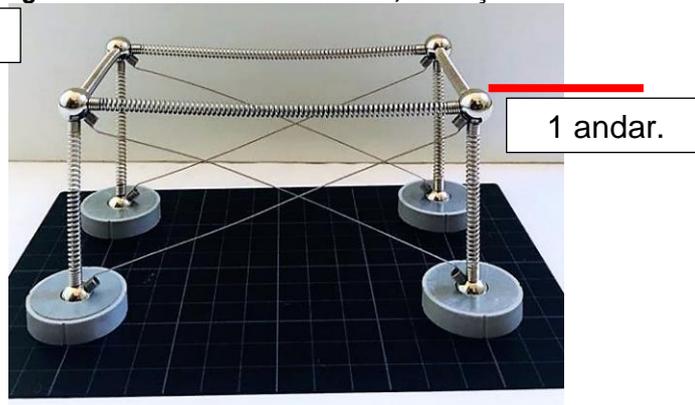
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 42 – Estrutura 01: Modelo 2, Condição C



Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 43 – Estrutura 01: Modelo 2, Condição D



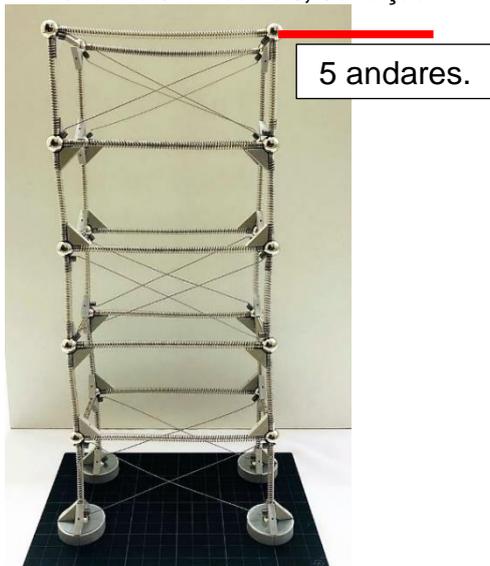
Fonte: Elaboração própria (2020).

Pode-se observar que este modelo quando comparado ao Modelo 1 apresenta um maior número de pavimentos na Condição A e apresenta uma deformada mais sutil em todas as condições, nos levando a notar o benefício trazido pelo tipo de contraventamento utilizado.

c) Modelo 3 – Contraventamento alternado em X:

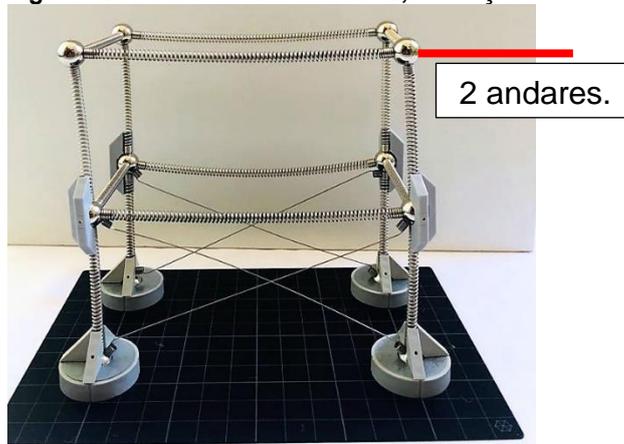
Na sequência tem-se as Figura 44, Figura 45, Figura 46 e Figura 47, as quais mostram as estruturais com contraventamento treliçado alternado do tipo X.

Figura 44 – Estrutura 01: Modelo 3, Condição A



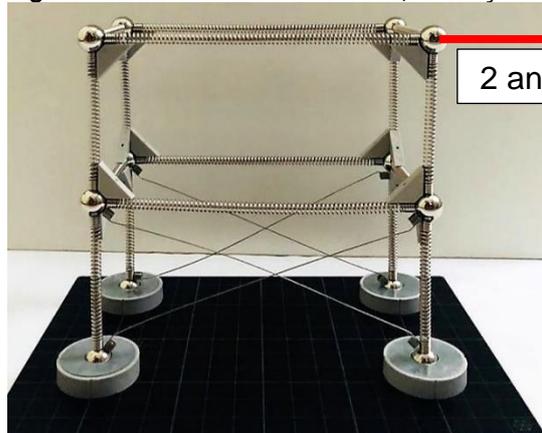
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 45 – Estrutura 01: Modelo 3, Condição B



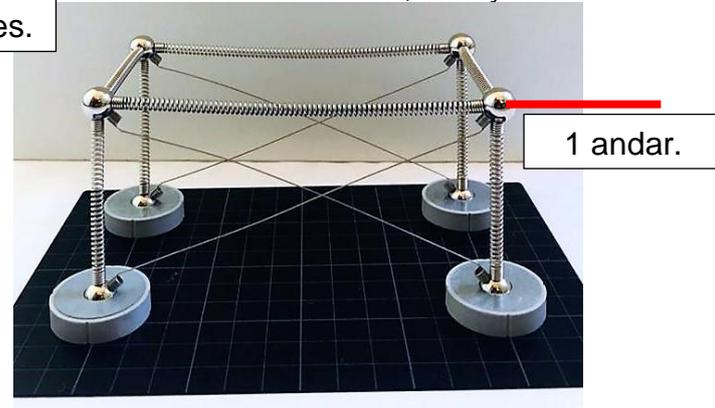
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 46 – Estrutura 01: Modelo 3, Condição C



Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 47 – Estrutura 01: Modelo 3, Condição D



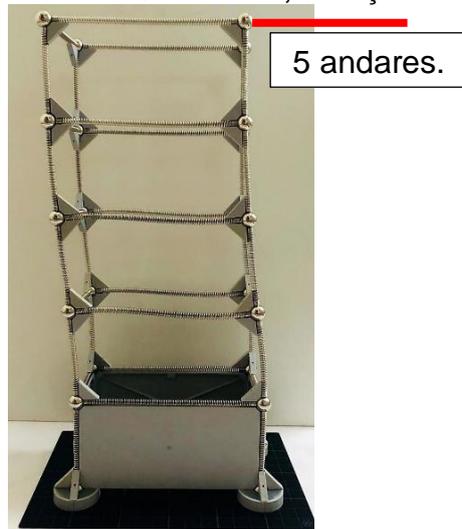
Fonte: Elaboração própria (2020).

Em relação ao número de pavimentos alcançado na Condição A, pode-se observar que a alternância deste contraventamento não se mostra tão eficiente quanto ao contraventamento contínuo.

d) Modelo 4 – Contraventamento com parede estrutural:

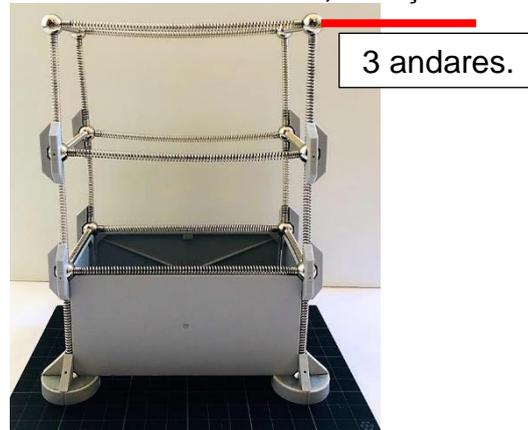
As estruturas hipotéticas montadas no Modelo 4 representam uma edificação com parede estrutural no subsolo. Nas Figura 48, Figura 49, Figura 50 e Figura 51 pode-se notar a eficiência deste contraventamento.

Figura 48 – Estrutura 01: Modelo 4, Condição A



Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 49 – Estrutura 01: Modelo 4, Condição B



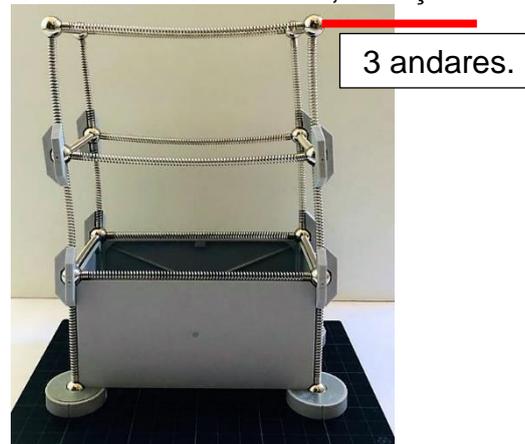
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 50 – Estrutura 01: Modelo 4, Condição C



Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 51 – Estrutura 01: Modelo 4, Condição D



Fonte: Elaboração própria (2020).

Neste modelo pode-se notar que nas Condições A e C o contraventamento mostrou-se eficiente, visto que se alcançou o mesmo número de pavimentos e uma pequena deformada.

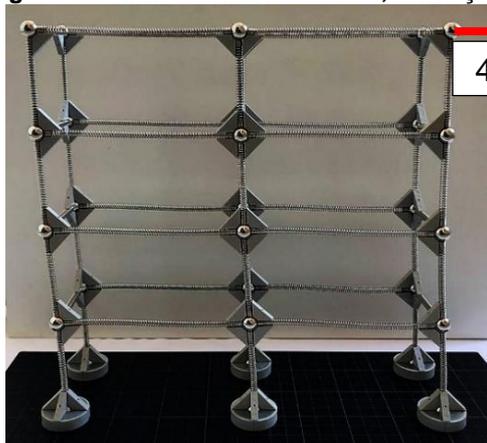
3.2.2.2 Estrutura hipotética 02

A estrutura hipotética 02 baseia-se em um pórtico espacial formado por seis pilares e cinco vigas. Na sequência, são apresentados os modelos construídos considerando a alternância das ligações dos elementos estruturais e do tipo de vinculação utilizado na fundação.

a) Modelo 1 – Sem contraventamento:

Seguindo as mesmas situações apresentadas anteriormente, o Modelo 1 consiste em protótipos sem nenhum tipo de arranjo estrutural com o objetivo de contraventar a modelo, conforme Figura 52, Figura 53, Figura 54 e Figura 55.

Figura 52 – Estrutura 01: Modelo 1, Condição A



4 andares.

Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 53 – Estrutura 01: Modelo 1, Condição



2 andares.

Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 54 – Estrutura 01: Modelo 1, Condição C



2 andares.

Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 55 – Estrutura 01: Modelo 1, Condição D



1 andar.

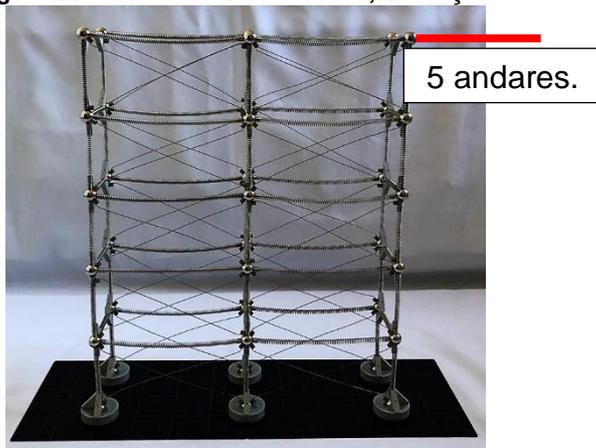
Fonte: Elaboração própria (2020).

É possível observar que se alcançou o mesmo número de pavimentos quando comparado a Estrutura hipotética 01.

b) Modelo 2 – Contraventamento contínuo em X:

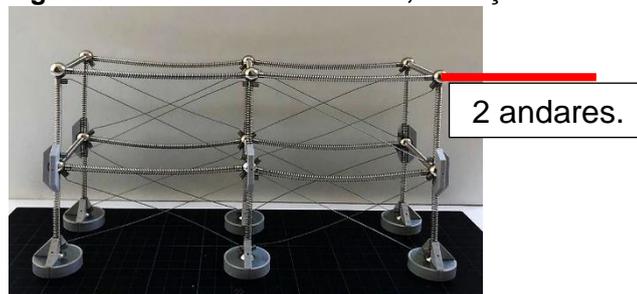
Nas Figura 56, Figura 57, Figura 58 e Figura 59 são apresentadas as estruturas com contraventamento treliçado contínuo do tipo X no Modelo 2.

Figura 56 – Estrutura 01: Modelo 2, Condição A



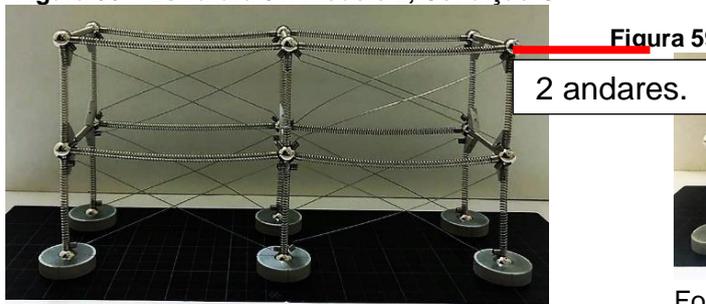
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 57 – Estrutura 01: Modelo 2, Condição B



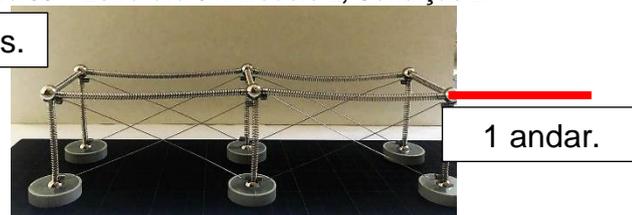
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 58 – Estrutura 01: Modelo 2, Condição C



Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 59 – Estrutura 01: Modelo 2, Condição D



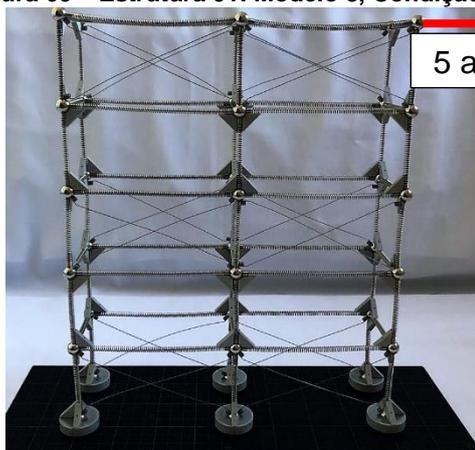
Fonte: Elaboração própria (2020).

Com relação ao número máximo de pavimentos pode-se observar a mesma situação apresentada no item a, onde reduziu-se o número de pavimentos quando comparado a estrutura hipotética 01.

c) Modelo 3 – Contraventamento alternado em X:

Dando continuidade à apresentação dos modelos, na Figura 60, Figura 61, Figura 62 e Figura 63 tem-se as estruturas construídas com contraventamento treliçado alternado do tipo X.

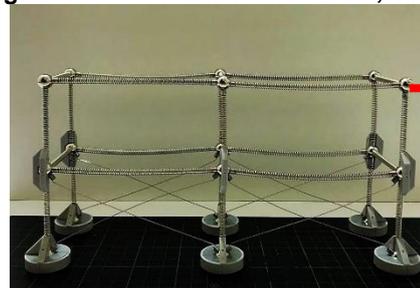
Figura 60 – Estrutura 01: Modelo 3, Condição A



5 andares.

Fonte: Elaboração própria (2020).

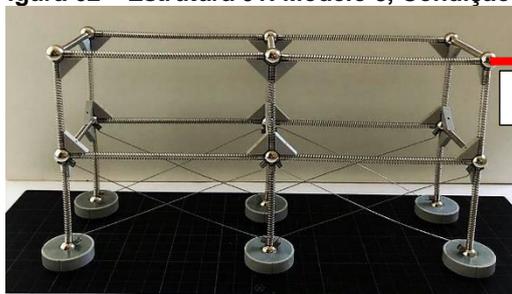
Figura 61 – Estrutura 01: Modelo 3, Condição B



2 andares.

Fonte: Elaboração própria (2020).

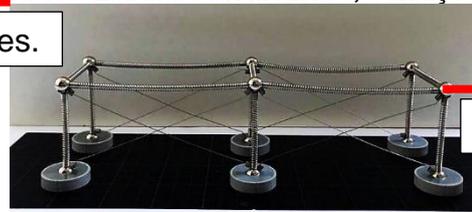
Figura 62 – Estrutura 01: Modelo 3, Condição C



2 andares.

Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 63 – Estrutura 01: Modelo 3, Condição D



1 andar.

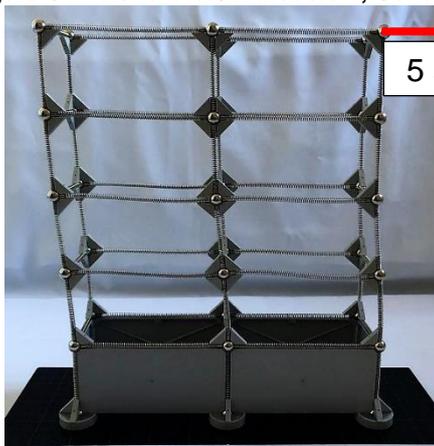
Fonte: Elaboração própria (2020).

Nesta situação observa-se que o número de pavimento se mantém quando comparado a Estrutura hipotética 01.

d) Modelo 4 – Contraventamento com parede estrutural:

Por fim, é apresentada a Figura 64, Figura 65, Figura 66 e Figura 67, onde o modelo representa uma estrutura com parede estrutural no subsolo.

Figura 64 – Estrutura 01: Modelo 4, Condição A



5 andares.

Fonte: Elaboração própria (2020).

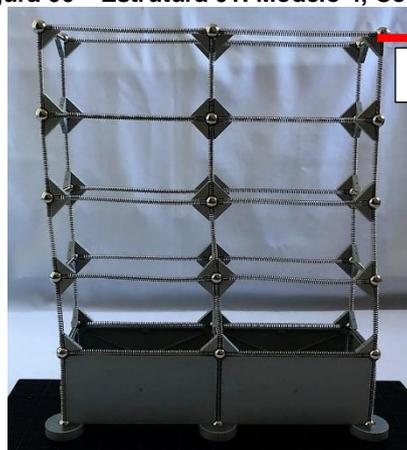
Figura 65 – Estrutura 01: Modelo 4, Condição B



3 andares.

Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 66 – Estrutura 01: Modelo 4, Condição C



5 andares.

Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 67 – Estrutura 01: Modelo 4, Condição D



3 andares.

Fonte: Elaboração própria (2020).

Os resultados aqui obtidos assemelham-se muito aos resultados encontrados no Modelo 4 da Estrutura Hipotética 01.

3.2.3 Concepção dos modelos numéricos

Na análise numérica assumiram-se as mesmas premissas adotadas nas Estruturas hipotéticas da análise qualitativa. No entanto, nesta análise alguns parâmetros mais específicos tiveram que ser determinados para que fosse possível a realização dos cálculos.

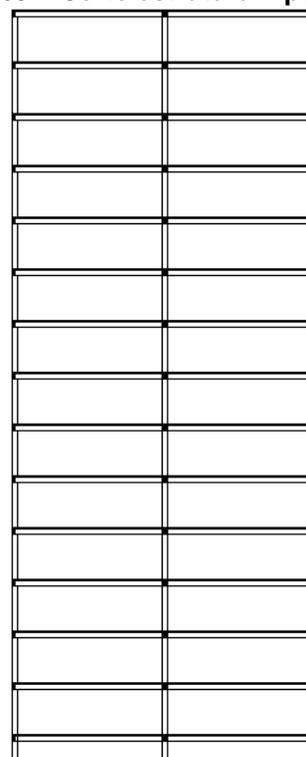
Para fins de análise definiram-se que as estruturas hipotéticas se tratam de edifícios residenciais de quatorze pavimentos, conforme os cortes apresentados na Figura 68 e Figura 69.

Figura 68 – Corte estrutura hipotética 01



Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 69 – Corte estrutura hipotética 02



Fonte: Elaboração própria (2020).

Visto que o modelo qualitativo Kit Molas não é um modelo onde pode-se quantificar o valor dos deslocamentos e das deformadas, não se preocupou em reproduzir exatamente as estruturas nas análises numéricas, atentando-se apenas a configuração dos elementos estruturais. Assim, o número de pavimentos dos modelos numéricos foi definido com o a intenção de relacionar a estabilidade dos modelos qualitativos com a estabilidade dos modelos numéricos.

Definiram-se que ambas estruturas são de concreto armado e estão localizadas na cidade de Florianópolis – SC.

Seguindo as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014), as quais visam a segurança e durabilidade da estrutura, adotou-se a classe de agressividade ambiental II – Moderada, por tratar-se de uma zona urbana. Ainda de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) para classes de agressividade moderada, deve-se admitir

concretos com resistência característica a compressão maior ou igual a 25MPa, sendo assim, considerou-se a classe de concreto C30 nesta pesquisa.

Abaixo, na Tabela 2, encontram-se os dados pertinentes a análise numérica das estruturas. As informações apresentadas a seguir são relevantes ao cálculo do módulo de elasticidade, das cargas atuantes na estrutura, das ações do vento e à modelagem das estruturas no Ftool.

Tabela 2 – Parâmetros adotados para as estruturas

F_{ck} (MPa)	30
Pé direito (m)	3,00
Nível da primeira laje (m)	1,50
Dimensão Pilares (m)	0,20x0,30
Dimensão vigas (m)	0,20x0,40
Espessura da laje (m)	0,10
Número de pavimentos	14
l₁ – estrutura 01 (m)	8,80
l₂ – estrutura 01 (m)	4,40
l₁ – estrutura 02 (m)	17,60
l₂ – estrutura 02 (m)	4,40

Fonte: Elaboração própria (2020).

3.2.3.1 Módulo de elasticidade do concreto

Após a definição das informações a respeito das estruturas, calculou-se o módulo de elasticidade do concreto, o qual de acordo com o item 8.2.8 da NBR 6118 (ABNT, 2014) pode ser estimado de acordo com a Equação 10, descrita abaixo.

$$E_{ci} = 5600 * \sqrt{f_{ck}} \quad (10)$$

Onde f_{ck} é a resistência característica a compressão do concreto utilizado na estrutura e é dado em megapascal. Assim, tem-se que:

$$E_{ci} = 5600 * \sqrt{30} \quad (10)$$

$$E_{ci} = 30672 \text{ MPa} \quad (10)$$

Na sequência calculou-se o módulo de elasticidade secante, o qual segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) deve ser utilizado em análises elásticas de projetos, especialmente na verificação de estados limites de serviço. O módulo de elasticidade secante pode ser calculado de acordo com a Equação 11.

$$E_{cs} = \alpha_i * E_{ci} \quad (11)$$

Onde o coeficiente α_i pode ser calculado conforme Equação 12.

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 * \frac{f_{ck}}{80} \quad (12)$$

Dessa forma, tem-se que:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 * \frac{f_{ck}}{80} \quad (12)$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 * \frac{30}{80} \quad (12)$$

$$\alpha_i = 0,8750 \quad (12)$$

Por fim, tem-se o valor de E_{cs} igual a:

$$E_{cs} = 0,8750 * 30.672 \quad (11)$$

$$E_{cs} = 26838 \text{ MPa} \quad (11)$$

3.2.3.2 Cargas atuantes nas estruturas

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) na análise estrutural deve-se considerar a influência de todas as ações, sendo elas permanentes e/ou acidentais, que possam produzir efeitos significativos para a segurança da estrutura estudada, e também, os possíveis estados limites últimos e os de serviço.

Dessa forma, assim como Reis (2007), adotou-se um valor total 10kN/m² para as ações permanentes e acidentais. Considerando 8kN/m² como ações permanentes e 2kN/m² como ações acidentais, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Ações verticais atuantes nas estruturas

Ação vertical	Valor (kN/m²)
Permanente - gk	8,00
Acidental - qk	2,00

Fonte: Elaboração própria (2020).

3.2.3.3 Ações do vento

As forças causadas devido ao vento foram calculadas conforme orientações da NBR 6123 (ABNT, 1988).

Assim, iniciaram-se os cálculos definindo-se a velocidade básica do vento, a qual é determinada em função do local onde encontra-se a edificação projetada. Conforme citado anteriormente, ambas as estruturas hipotéticas estudadas neste trabalho de conclusão de curso localizam-se no município de Florianópolis – SC, sendo assim, a velocidade básica do vento é aproximadamente 42m/s, conforme gráfico de isopleias apresentado na NBR 6123 (ABNT, 1988).

Após a definição da velocidade básica do vento, definiu-se o fator topográfico S_1 , Tabela 4, onde considerou-se um terreno plano ou fracamente acidentado, conforme NBR 6123 (ABNT, 1988).

Tabela 4 – Fator topográfico

S_1	1,00
-------------------------	------

Fonte: Elaboração própria (2020).

Na sequência calculou-se os valores de S_2 , conforme Equação 8, apresentada no capítulo 2.5.2.1.

Para tanto, considerou-se que os terrenos das edificações em questão enquadrem-se na Categoria V, conforme NBR 6123 (ABNT, 1988), a qual engloba centro de grandes cidades e na Classe B, onde a maior dimensão vertical ou horizontal da edificação deva estar entre 20 e 50 metros. Dessa forma, obteve-se os valores de

b, F_r e p , Tabela 5, com o auxílio da tabela de parâmetros meteorológicos disponível na NBR 6123 (ABNT, 1988).

Tabela 5 – Parâmetros para cálculo de S_2

b	0,73
F_r	0,98
p	0,160

Fonte: Elaboração própria (2020).

Abaixo, na Tabela 6 encontram-se os valores de cálculo do parâmetro S_2 . Z representa o nível de cada pavimento.

Tabela 6 – Valores calculados de S_2

Pavimento	z (m)	S_2
0	0,00	0,000
1	3,00	0,590
2	6,00	0,659
3	9,00	0,703
4	12,00	0,737
5	15,00	0,763
6	18,00	0,786
7	21,00	0,806
8	24,00	0,823
9	27,00	0,839
10	30,00	0,853
11	33,00	0,866
12	36,00	0,878
13	39,00	0,889
14	42,00	0,900

Fonte: Elaboração própria (2020).

Em seguida definiu-se o fator estatístico S_3 , Tabela 7, o qual leva em consideração o tipo de edificação, o grau de segurança solicitado e a vida útil da edificação, e pode ser definido com o auxílio da Tabela 3 disponível na NBR 6123 (ABNT, 1988).

Tabela 7 – Fator estatístico

S_3	1,00
-------------------------	------

Fonte: Elaboração própria (2020).

Com todos os parâmetros em mãos e com os valores de S_2 já calculados, iniciou-se o cálculo da velocidade característica do vento em cada pavimento,

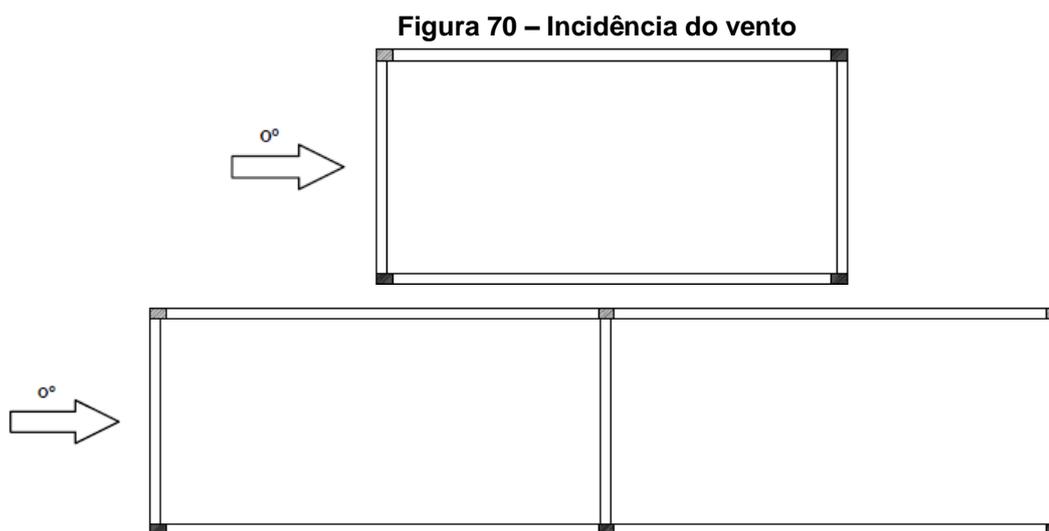
conforme Equação 7. Na sequência calculou-se os valores da pressão de obstrução, conforme Equação 6. Estes valores encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Velocidade característica e pressão de obstrução do vento.

Pavimento	z (m)	V_{ki} (m/s)	q_i (N/m ²)
0	0,00	0,00	0,00
1	3,00	24,78	376,47
2	6,00	27,69	469,96
3	9,00	29,54	535,07
4	12,00	30,94	586,67
5	15,00	32,06	630,10
6	18,00	33,01	667,95
7	21,00	33,83	701,73
8	24,00	34,56	732,36
9	27,00	35,22	760,49
10	30,00	35,82	786,57
11	33,00	36,37	810,93
12	36,00	36,88	833,82
13	39,00	37,36	855,46
14	42,00	37,80	875,99

Fonte: Elaboração própria (2020).

Logo após o cálculo da pressão de obstrução, definiu-se o coeficiente de arrasto. Considerou-se o vento agindo sobre as estruturas a zero graus, Figura 70.



Fonte: Elaboração própria (2020).

Considerando a incidência do vento a zero graus e por meio das relações entre as dimensões e a altura das estruturas, chegou-se ao coeficiente de arrasto,

Tabela 9, o mesmo pode ser obtido com o auxílio da Figura 4 apresentada na NBR 6123 (ABNT, 1988).

Tabela 9 – Coeficiente de arrasto

Estrutura 01		Estrutura 02	
L1/L2	0,50	L1/L2	0,25
H/L1	9,55	H/L1	9,55
Ca	1,15	Ca	0,85

Fonte: Elaboração própria (2020).

E por fim, calculou-se força de arrasto, apresentada na Tabela 10, equivalente às ações do vento atuantes em cada pavimento da estrutura.

Tabela 10 – Força de arrasto

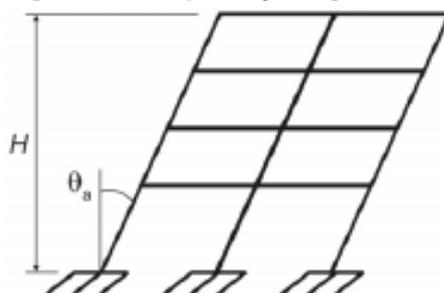
Pavimento	z (m)	A_e (m²)	Estrutura 01	Estrutura 02
			F_a (kN)	F_a (kN)
0	0,00	0	0	0
1	3,00	13,20	5,71	6,46
2	6,00	13,20	7,13	7,51
3	9,00	13,20	8,12	8,24
4	12,00	13,20	8,91	8,82
5	15,00	13,20	9,56	9,31
6	18,00	13,20	10,14	9,73
7	21,00	13,20	10,65	10,11
8	24,00	13,20	11,12	10,45
9	27,00	13,20	11,54	10,77
10	30,00	13,20	11,94	11,06
11	33,00	13,20	12,31	11,33
12	36,00	13,20	12,66	11,59
13	39,00	13,20	12,99	11,83
14	42,00	13,20	6,65	7,15

Fonte: Elaboração própria (2020).

3.2.3.4 Desaprumo

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) na análise global de estruturas, deve-se considerar o desaprumo dos elementos verticais, conforme Figura 71. Assim, na sequência calculou-se a força horizontal equivalente ao desaprumo da estrutura.

Figura 71 – Imperfeições geométricas



Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014).

O desaprumo de uma estrutura pode ser calculado conforme Equação 13, de acordo com as indicações da NBR 6118 (ABNT, 2014).

$$\theta_a = \theta_1 * \sqrt{\frac{1+\frac{1}{n}}{2}} \quad (13)$$

Onde θ_1 é o menor valor entre $\frac{1}{300}$ e $\frac{1}{100\sqrt{H}}$, em que H represente a altura total da edificação e n o número de prumadas de pilares.

A força equivalente a ele calcula-se em função das ações permanentes e acidentais atuantes na estrutura, conforme a Equação 14.

$$F_{eq} = \theta_a * (g_k + q_k) \quad (14)$$

Na Tabela 11 encontram-se os valores da força equivalente ao desaprumo nas Estruturas 01 e 02.

Tabela 11 – Força equivalente ao desaprumo

F_{eq} (kN)	Estrutura 01	Estrutura 02
		1,12

Fonte: Elaboração própria (2020).

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), não necessariamente deve-se sobrepor a força equivalente ao desaprumo ao carregamento de vento. A

consideração dessas ações deve ser realizada de acordo com as seguintes recomendações:

- Quando 30% da ação do vento for maior que a ação do desaprumo, deve-se considerar apenas a ação do vento.
- Quando 30% da ação do desaprumo for maior que a ação do vento, deve-se considerar apenas o desaprumo.
- E no demais casos deve-se realizar a combinação entre as duas ações.

Comparando a Tabela 10 com a Tabela 11, nota-se que os maiores valores são devidos a ação do vento, os quais serão levados em consideração na análise numérica.

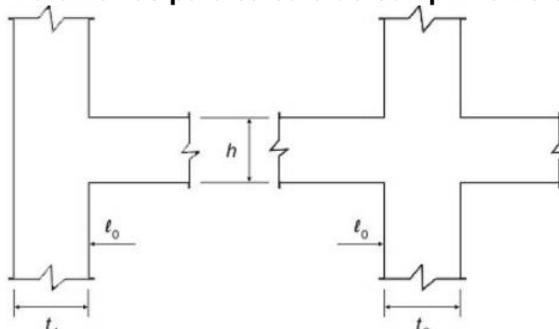
3.2.3.5 Modelagem no software Ftool

A modelagem no *software* Ftool iniciou-se pelo desenho da estrutura, onde considerou-se o comprimento efetivo das vigas, o qual pode ser obtido através da Equação 15.

$$l_{ef} = l_0 + a_1 + a_2 \quad (15)$$

Onde l_{ef} é o comprimento efetivo da viga, l_0 representa o vão livre, e $a_1 \leq \left\{ \begin{array}{l} \frac{t_1}{2} \\ 0,3 * h \end{array} \right\}$ e $a_2 \leq \left\{ \begin{array}{l} \frac{t_2}{2} \\ 0,3 * h \end{array} \right\}$. Abaixo, na Figura 72 encontram-se os parâmetros para cálculo do comprimento efetivo.

Figura 72 – Parâmetros para cálculo do comprimento efetivo



Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014).

Assim, através da Equação 15, calculou-se o comprimento efetivo da viga, o mesmo encontra-se na Tabela 12.

Tabela 12 – Comprimento efetivo das vigas

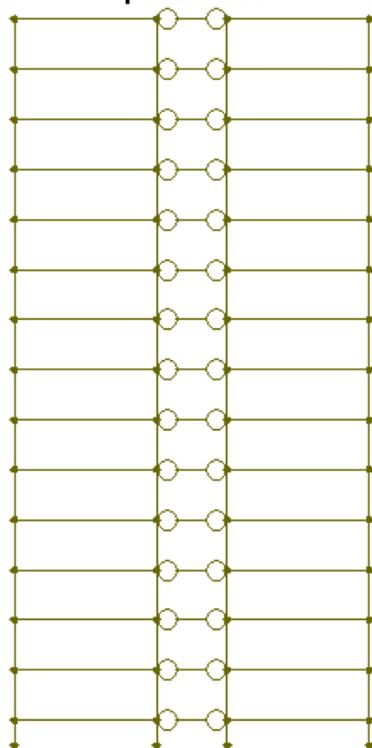
l_{ef} (m)	8,44
--------------	------

Fonte: Elaboração própria (2020).

Considerando que o *software* Ftool é um programa de análise estrutural bidimensional planificou-se as estruturas, conforme Figura 73, para torná-las compatíveis com o programa utilizado.

Optou-se também por simplificar as análises e dessa forma utilizou-se um único pórtico das estruturas, Figura 74. Tal adaptação foi possível em função da simetria apresentada pelos modelos admitidos neste estudo.

Figura 73 – Estrutura hipotética 01 planificada



Fonte: Adaptado de Ftool (2020).

Figura 74 – Estrutura hipotética 01 simplificada



Fonte: Adaptado de Ftool (2020).

Considerando que as estruturas apresentam dois pórticos simétricos paralelos, dividiu-se a força horizontal do vento por dois, uma vez que se tem dois pórticos atuantes, conforme Tabela 13.

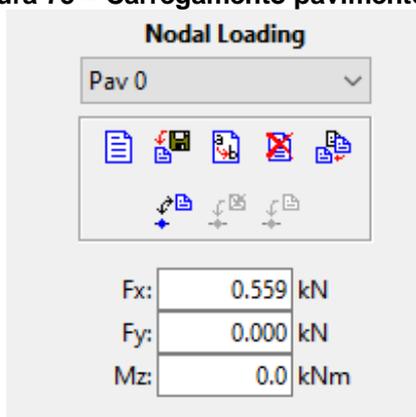
Tabela 13 – Força de tombamento aplicada nas estruturas

Pavimento	z (m)	Estrutura 01	Estrutura 02
		Ftool (kN)	Ftool (kN)
0	0,00	0,559	1,118
1	3,00	2,857	3,230
2	6,00	3,567	3,754
3	9,00	4,061	4,120
4	12,00	4,453	4,409
5	15,00	4,782	4,653
6	18,00	5,070	4,865
7	21,00	5,326	5,054
8	24,00	5,559	5,226
9	27,00	5,772	5,384
10	30,00	5,970	5,530
11	33,00	6,155	5,667
12	36,00	6,329	5,795
13	39,00	6,493	5,917
14	42,00	3,324	3,575

Fonte: Elaboração própria (2020).

A aplicação dos carregamentos deu-se por meio do comando “Nodal Loading”, onde criou-se um carregamento “Fx”, Figura 75, para cada pavimento do modelo e posteriormente aplicou-se um a um nos seus respectivos nós.

Figura 75 – Carregamento pavimento zero.



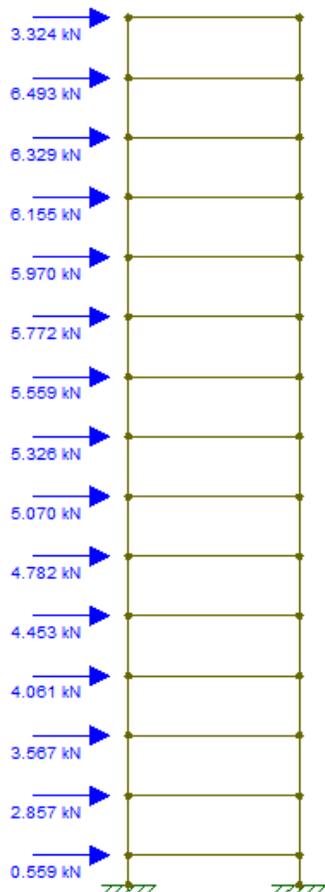
Fonte: Adaptado de Ftool (2020).

Na sequência definiram-se as propriedades das seções dos elementos, conforme descrito na Tabela 2, e a módulo de elasticidades do concreto, conforme Equação 10, através do comando “Section Properties” e “Material Parameters”, nessa ordem.

Na Figura 76 tem-se a Estrutura hipotética 01, Modelo 1, condição de contorno A, modelada com as cargas apresentadas Tabela 13, aplicadas nos

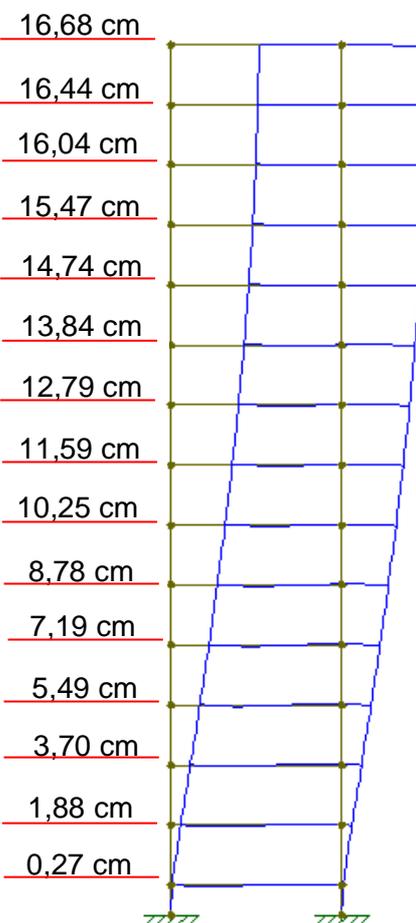
respectivos nós. Após a aplicação dos carregamentos e definição dos parâmetros, alcançou-se a configuração deformada da estrutura, onde foi possível obter o valor dos deslocamentos horizontais em cada pavimento, apresentados na Figura 77.

Figura 76 – Cargas horizontais lançadas na estrutura



Fonte: Adaptado de Ftool (2020).

Figura 77 – Deslocamentos da estrutura



Fonte: Adaptado de Ftool (2020).

O mesmo processo foi realizado para os demais modelos. Obtidos os deslocamentos horizontais, partiu-se para a definição das combinações de ações utilizadas no cálculo do coeficiente γ_z .

3.2.3.6 Combinações de ações para obtenção do coeficiente γ_z

Anteriormente ao cálculo do coeficiente γ_z , definiram-se as combinações últimas, uma vez que de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) a segurança de estruturas de concreto sempre deve ser verificada em relação ao estado limite último.

Para tanto, considerou-se duas combinações últimas normais distintas, conforme Equação 16.

$$F_d = \gamma_g * F_{gk} + \gamma_q * (F_{q1k} + \sum \psi_{0j} F_{qjk}) \quad (16)$$

Onde γ_g corresponde ao coeficiente de ponderação das ações permanentes no ELU, F_{gk} consiste nas ações permanentes diretas, γ_q o coeficiente de ponderação das ações permanentes no ELU, γ_q o coeficiente de ponderação das ações variáveis no ELU, F_{q1k} a ação variável principal, ψ_{0j} o coeficiente redutor das ações variáveis secundárias e por fim, F_{qjk} representa a ação variável secundária.

Assim, na primeira combinação tem-se a carga acidental ocupando a posição de ação variável principal, e conseqüentemente o vento a posição de ação variável secundária. E, na segunda combinação, o vento sendo considerado como ação variável principal e a carga acidental como ação variável secundária, conforme descrito abaixo.

- a) Combinação 01: $\gamma_g * \text{Ação permanente} + \gamma_q * (\text{Ação variável} + \psi_{0j} * \text{vento } 0^\circ)$
- b) Combinação 02: $\gamma_g * \text{Ação permanente} + \gamma_q * (\text{vento } 0^\circ + \psi_{0j} * \text{Ação variável})$

Os coeficientes de ponderação foram definidos conforme Figura 78. Adotando-se assim, o valor de $\gamma_g = 1,4$ e $\gamma_q = 1,4$ para os coeficientes de ponderação das ações permanentes e variáveis, respectivamente.

Figura 78 – Coeficientes de ponderação conforme NBR 6118 (ABNT, 2014)

Combinações de ações	Ações							
	Permanentes (g)		Variáveis (q)		Protensão (p)		Recalques de apoio e retração	
	D	F	G	T	D	F	D	F
Normais	1,4 ¹⁾	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0
Especiais ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	0
Excepcionais	1,2	1,0	1,0	0	1,2	0,9	0	0

Onde:
D é desfavorável, *F* é favorável, *G* representa as cargas variáveis em geral e *T* é a temperatura.
¹⁾ Para as cargas permanentes de pequena variabilidade, como o peso próprio das estruturas, especialmente as pré-moldadas, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3.

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014).

Já os coeficientes de redução das ações variáveis foram definidos segundo a Figura 79. Dessa forma, tem-se que $\psi_{0j} = 0,5$ para a Combinação 01 e $\psi_{0j} = 0,6$ para a Combinação 02.

Figura 79 – Coeficiente de redução de ações conforme NBR 6118 (ABNT, 2014)

Ações		γ_a		
		ψ_a	$\psi_1^{1)}$	ψ_2
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ²⁾	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 elevada concentração de pessoas ³⁾	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, 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

¹⁾ Para os valores de ψ_1 relativos às pontes e principalmente aos problemas de fadiga, ver seção 23.
²⁾ Edifícios residenciais.
³⁾ Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014).

3.2.3.7 Cálculo do coeficiente γ_z

Em conformidade com o que foi dito anteriormente, neste trabalho de conclusão de curso optou-se por estudar a estabilidade global das estruturas por meio do coeficiente γ_z , visto que este é um parâmetro simplificado, que permite também estimar os esforços de segunda ordem e determinar o grau de instabilidade das estruturas.

Obtidos os deslocamentos em cada pavimento das estruturas estudadas, iniciou-se o cálculo do coeficiente γ_z através da Equação 4.

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (4)$$

Com as Combinações 01 e 02, apresentadas em 3.2.3.6, calcularam-se os momentos de primeira ordem com a Equação 16.

$$\Delta M_{tot,d} = (\gamma_g * F_{gk} + \gamma_q * (F_{q1k} + \sum \psi_{0j} F_{qjk})) * \delta_{hi} \quad (16)$$

Sendo δ_{hi} o deslocamento em cada pavimento dado em metros.

Na sequência, calculou-se o momento de tombamento da estrutura, conforme Equação 17.

$$M_{1,tot,d} = F_{dtot,d} * \gamma_f * z \quad (17)$$

Onde γ_f representa o coeficiente de ponderação das ações e pode ser obtido com auxílio da Figura 78, neste caso, adotou-se $\gamma_f = 1,4$. E z representa a altura do pavimento da edificação em relação a base.

Na Tabela 14 encontram-se os valores dos momentos de primeira ordem e do momento de tombamento, pavimento a pavimento, assim como o somatório desses momentos para a Estrutura 1, Modelo 1 condição de contorno A.

Tabela 14 – Momento de primeira ordem e momento de tombamento

Pavimento	z (m)	Combinação 01		Combinação 02	
		$\Delta M_{tot,d}$ (kN.m)	$M_{1tot,d}$ (kN.m)	$\Delta M_{tot,d}$ (kN.m)	$M_{1tot,d}$ (kN.m)
0	0,00	1,24	0,00	1,86	0,00
1	3,00	8,54	14,40	12,81	24,00
2	6,00	16,86	35,96	25,29	59,93
3	9,00	25,00	61,41	37,51	102,34
4	12,00	32,74	89,77	49,11	149,62
5	15,00	39,98	120,52	59,98	200,86
6	18,00	46,68	153,31	70,02	255,52
7	21,00	52,77	187,90	79,16	313,17
8	24,00	58,23	224,12	87,35	373,54
9	27,00	63,03	261,82	94,54	436,37
10	30,00	67,11	300,89	100,66	501,48
11	33,00	70,45	341,23	105,68	568,72
12	36,00	73,03	382,76	109,55	637,93
13	39,00	74,85	425,42	112,27	709,03
14	42,00	75,95	234,57	113,93	390,95
Σ (kN.m)		706,46	2834,07	1059,69	4723,45

Fonte: Elaboração própria (2020).

A partir dos momentos calculados, obteve-se os valores do coeficiente γ_z para as duas combinações, assim como, a classificação da estrutura quanto ao tipo de nós. Os mesmos encontram-se na Tabela 15.

Tabela 15 – Valores do coeficiente γ_z

γ_z	Combinação 01	Combinação 02
		1,332
Classificação	Nós móveis	Nós móveis
$\gamma_{zadotado}$	1,332	

Fonte: Elaboração própria (2020).

O mesmo procedimento foi feito para os demais modelos por meio de planilha eletrônica e serão apresentados e discutidos no capítulo 4.1 nos Gráfico 1 e Gráfico 2.

3.2.4 Deslocamentos das estruturas

Para a obtenção dos deslocamentos realizaram-se novas simulações no *software* Ftool. Dessa vez, além das ações horizontais, aplicou-se também ações verticais às estruturas, as mesmas foram obtidas conforme apresentado nos itens a seguir.

3.2.4.1 Combinações de ações para obtenção dos deslocamentos

Para a obtenção dos deslocamentos das estruturas utilizou-se a combinação quase permanente de serviço, uma vez que que as análises deste trabalho estão direcionadas para o comportamento da estrutura. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) pode ser descrita conforme a Equação 17.

$$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + \sum \varphi_{2j} * F_{qj,k} \quad (17)$$

Onde $F_{gi,k}$ é o valor característicos das ações permanentes, φ_{2j} o fator de redução de combinação quase permanente para ELS e $F_{qj,k}$ o valor da ação variável.

Observou-se no cálculo do coeficiente γ_z a situação mais crítica, seja ela ação variável como ação principal ou vento como ação principal, e assim adotou-se a mesma situação para a combinação de serviço. Na Tabela 16 encontra-se os valores adotados para o fator de redução de combinação.

Tabela 16 – Fator de redução de combinação quase permanente para ELS

Ψ_2 , sobrecarga	0,50
Ψ_2 , vento	0,60

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014).

3.2.4.2 Cálculo das ações verticais

Sabendo que a ação variável principal foi a sobrecarga em todos os casos analisados, calculou-se novamente as ações do vento com o auxílio do coeficiente de redução apresentado na Tabela 16. Abaixo, na Tabela 17, pode-se observar os valores recalculados para as ações do vento.

Tabela 17 – Ações do vento reduzidas

Pavimento	Estrutura 01	Estrutura 02
	Fa (kN)	Fa (kN)
0	0,335	0,671
1	1,714	1,938
2	2,140	2,253
3	2,437	2,472
4	2,672	2,645
5	2,869	2,792
6	3,042	2,919
7	3,196	3,033
8	3,335	3,136
9	3,463	3,230
10	3,582	3,318
11	3,693	3,400
12	3,797	3,477
13	3,896	3,550
14	1,995	2,145

Fonte: Elaboração própria (2020).

Resultando então, no deslocamento no topo da estrutura apresentado na Tabela 18, para a modelo 1, condição A – estrutura hipotética 01.

Tabela 18 – Deslocamento no topo da estrutura

δ_{14} (m)	0,114
-------------------	-------

Fonte: Elaboração própria (2020).

Todo o processo aqui descrito foi realizado para as demais estruturas citadas na Tabela 1. Na sequência, no capítulo 4.2, os resultados serão apresentados e discutidos com o auxílio do Gráfico 3 e Gráfico 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

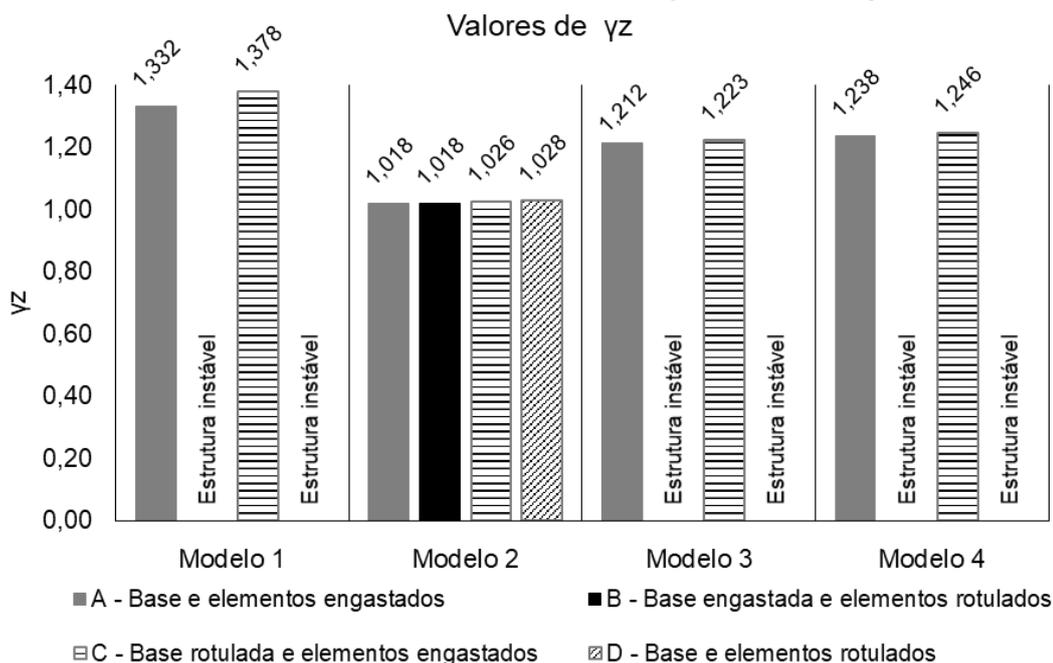
Neste trabalho de conclusão de curso realizaram-se estudos qualitativos a respeito do comportamento das estruturas com o intuito de incentivar o uso dessas análises previamente a uma análise numérica, buscando facilitar o processo de análise estrutural.

Assim, calculou-se o coeficiente γ_z com o objetivo de classificar as estruturas quanto a sua estabilidade, determinou-se o deslocamento horizontal no topo de cada modelo e por fim, relacionou-se o comportamento qualitativo das estruturas ao comportamento resultante das análises numéricas. Dessa forma, neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no decorrer da pesquisa.

4.1 Coeficiente γ_z

Conforme descrito anteriormente, o coeficiente γ_z trata-se de um parâmetro que permite analisar o grau de estabilidade das estruturas, onde valores maiores de 1,30, representam estruturas com alto grau de instabilidade, podendo até significar estruturas hipostáticas em determinados casos.

Abaixo, no Gráfico 1, são apresentados os valores de γ_z para os modelos estudados na estrutura hipotética 01, de acordo com a Tabela 1.

Gráfico 1 – Valores do coeficiente γ_z - Estrutura hipotética 01

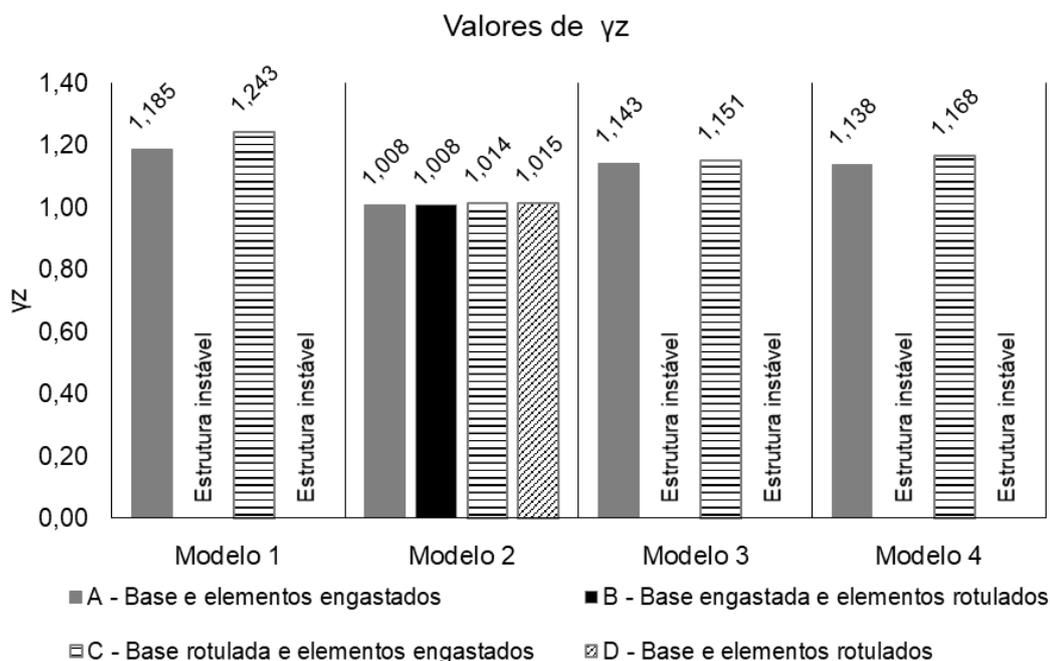
Fonte: Elaboração própria (2020).

Conforme Gráfico 1 pode-se observar que apenas o Modelo 2, contraventamento contínuo em X, enquadrou-se na classificação de nós fixos, uma vez que apenas os seus valores encontram-se dentro da condição estabelecida pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Dessa forma, concluiu-se a efetividade deste tipo de contraventamento na fachada das edificações.

Quando comparados os valores obtidos para o Modelo 1, sem contraventamento, para os Modelo 3, contraventamento alternado em X e Modelo 4, contraventamento com parede estrutural, é possível notar uma variabilidade considerável nos valores do coeficiente γ_z . Tal fato constata a eficiência desses dois sistemas estruturais de contraventamento, uma vez que alguns autores como Carmo (1995), afirmam que os valores deste coeficiente podem chegar até valores próximos ou iguais a 1,30.

Ainda no Gráfico 1, observa-se que alguns modelos se encontram classificados como “Estrutura instável”, nessas situações os modelos apresentaram deslocamentos horizontais no topo tão elevados que o pórtico foi classificado como hipoestático. Em alguns casos não foi possível ser analisado no Ftool.

No Gráfico 2, são apresentados os valores do coeficiente γ_z para a estrutura hipotética 02.

Gráfico 2 – Valores do coeficiente γ_z - Estrutura hipotética 02

Fonte: Elaboração própria (2020).

Apesar de a estrutura hipotética 02 apresentar uma maior dimensão em uma de suas laterais, pode-se notar que algumas situações se repetem quando comparadas às situações apresentadas no Gráfico 1, tais como a classificação de nós fixos apenas para o modelo 2 e de nós móveis para os demais.

Nota-se uma redução nos valores de γ_z . Em relação a redução o valor numérico do coeficiente γ_z , observou-se uma grande eficiência apresentada pelo aumento na dimensão de uma das laterais da estrutura visto que, a redução deste valor apresentou-se já na primeira casa decimal.

Pelos estudos apresentados por Carmo (1995) todos os modelos enquadram-se dentro do limite de $\gamma_z \leq 1,30$.

Em relação aos tipos de contraventamento utilizados, observou-se a eficiência do uso das paredes estruturais, apresentada no modelo 4. Uma vez que, neste modelo os valores do coeficiente γ_z mostram-se reduzidos quando comparados ao modelo 1, mesmo que utilizados apenas em um único pavimento.

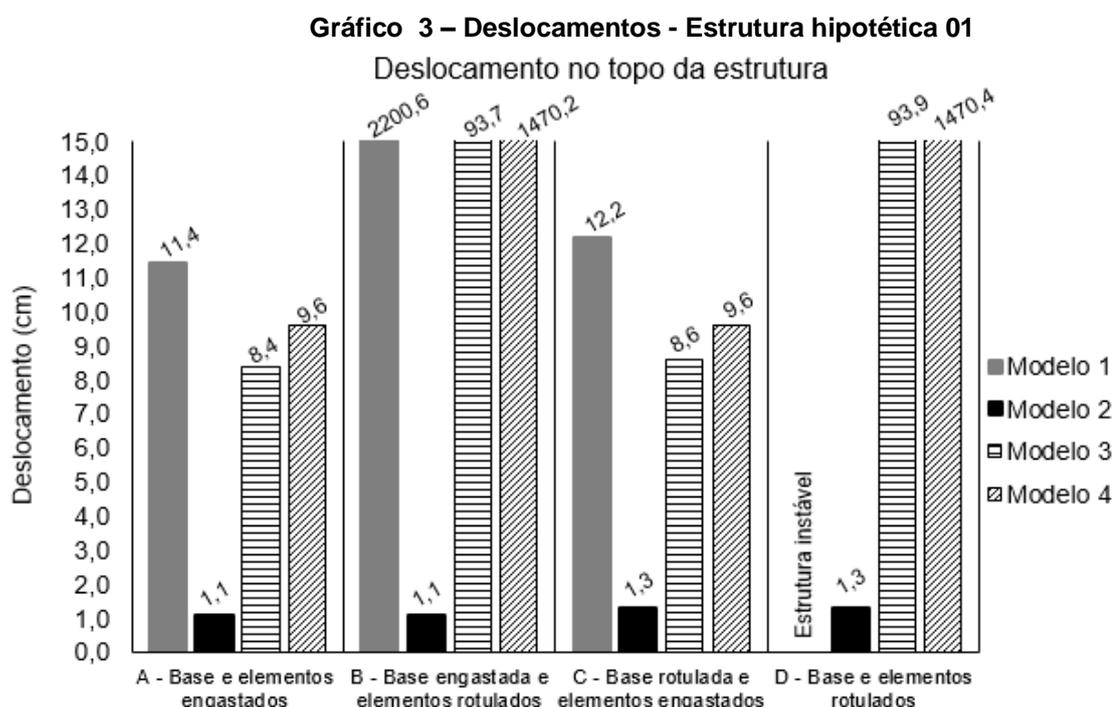
Analisando o Gráfico 1 e o Gráfico 2 percebeu-se também que o tipo de ligação entre os elementos estruturais interfere mais na questão da estabilidade global da estrutura, do que a condição de contorno das fundações propriamente. Observou-

se que as estruturas classificadas como instáveis, são aquelas onde os elementos estruturais encontram-se rotulados.

4.2 Deslocamento horizontal no topo das estruturas

Os deslocamentos apresentados neste capítulo dizem respeito ao deslocamento horizontal no topo da estrutura, ou seja, o deslocamento apresentado pelo último pavimento de cada modelo.

No Gráfico 3 encontram-se os deslocamentos apresentados pelos modelos estudados na estrutura hipotética 01.



Analisando o Gráfico 3, notou-se que os modelos que apresentam seus elementos estruturais e sua base engastados, resultam em um deslocamento menor, quando comparado aos demais.

Observou-se também que os modelos 1 – Sem sistema de contraventamento – e 4 – Contraventado com parede estrutural – apresentaram um grande deslocamento horizontal nas situações de base engastada e elementos

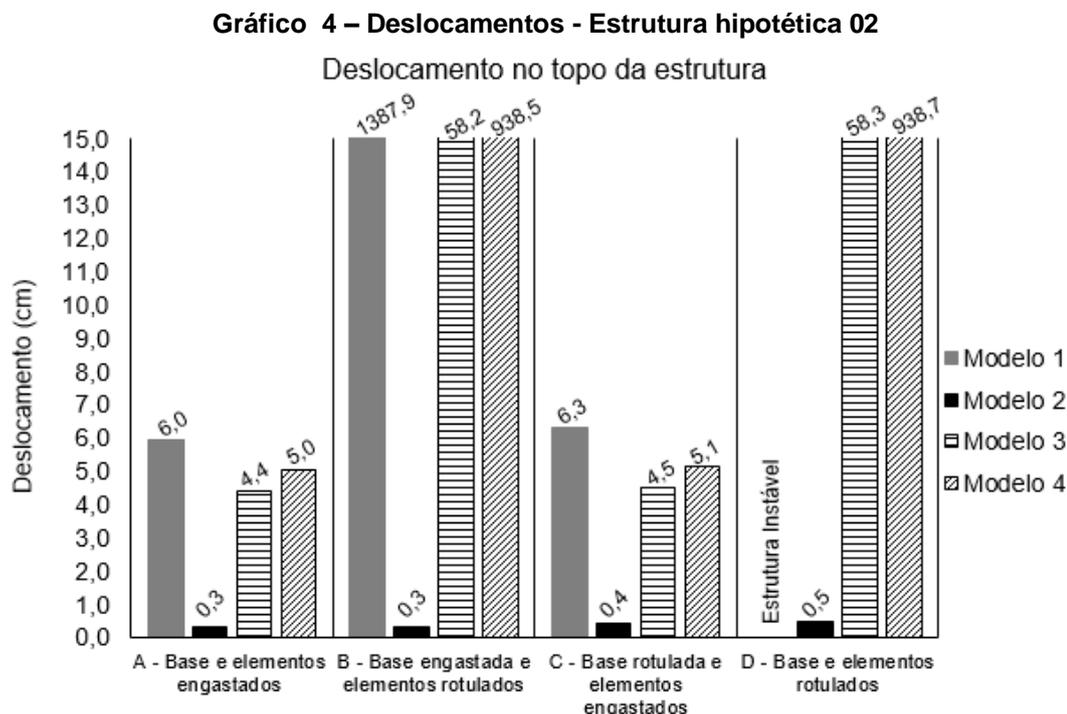
rotulados e de base e elementos rotulados, concluindo então a instabilidade das estruturas nessas situações.

Cabe destacar que o deslocamento horizontal máximo permitido no topo de uma edificação, de acordo com a Tabela 13.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014), é de $\frac{H}{1700}$, onde H representa a altura total da edificação. Considerando uma estrutura com 42 metros, tem o limite igual a 2,47 cm.

Levando em conta o limite de deslocamento apresentando pela NBR 6118 (ABNT, 2014) pode-se observar, pelo Gráfico 3, que apenas o modelo 2 enquadrou-se dentro desta margem.

No Gráfico 3, assim como no Gráfico 1 e no Gráfico 2, as estruturas apresentadas como “Estrutura instável” resultaram em valores do coeficiente γ_z que puderam ser desprezados, justificado pelo alto grau de deslocabilidade do pórtico. Entende-se, desta forma, tratar-se de estruturas hipostática, não podendo ser analisadas no *software* Ftool.

Na sequência, no Gráfico 4, são apresentados os valores dos deslocamentos para os modelos da estrutura hipotética 02.



Fonte: Elaboração própria (2020).

Através do Gráfico 4, notou-se que alguns modelos, como modelo 1 e 4 nas situações de base engastada e elementos rotulados e base e elementos rotulados, assim como na estrutura hipotética 01, apresentam um deslocamento exagerado.

Em todas as situações observou-se uma redução considerável nos deslocamentos das estruturas, quando comparados com a estrutura 01. Podendo então, concluirmos que o aumento na dimensão da estrutura e a inclusão de mais elementos estruturais, dois pilares e uma viga, confere a ela maior estabilidade.

Conjuntamente aos valores do coeficiente γ_z constatou-se a eficiência dos contraventamentos contínuo em X, uma vez que, os modelos com este tipo de sistema de contraventamento apresentaram bons valores para o coeficiente γ_z e valores dentro do limite para os deslocamentos.

4.3 Comportamento das deformadas

Neste capítulo serão apresentadas as estruturas desenvolvidas no modelo qualitativo Kit Molas e as estruturas elaboradas no *software* Ftool, a fim de relacionar o comportamento obtido em ambas análises. Todos os modelos qualitativos apresentados foram construídos até o seu limite de pavimentos, ou seja, até atingirem a ruína.

Neste momento, serão apresentadas as deformadas decorrentes da aplicação dos carregamentos verticais e horizontais.

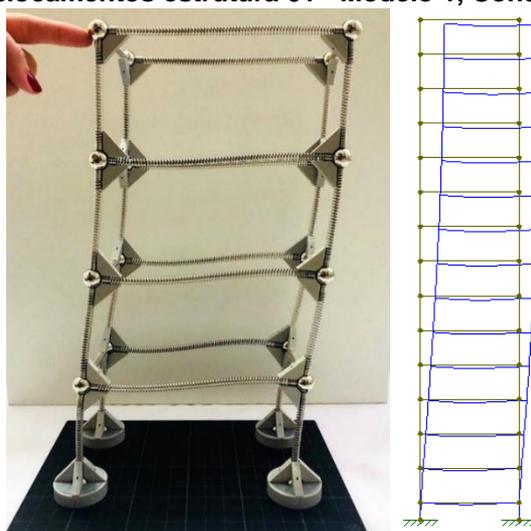
4.3.1 Estrutura hipotética 01

Primeiramente serão apresentados os modelos construídos para a estrutura hipotética 01.

a) Modelo 1 – Sem contraventamento:

Na sequência, Figura 80, Figura 81, Figura 82 e Figura 83, tem-se as estruturas deformadas no modelo qualitativo e no *software*.

Figura 80 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 1, Condição A



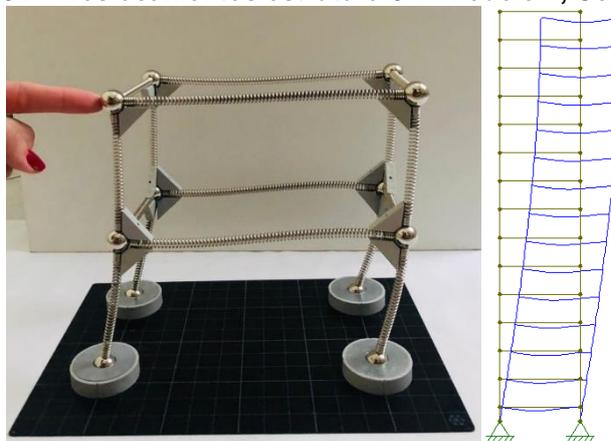
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 81 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 1, Condição B



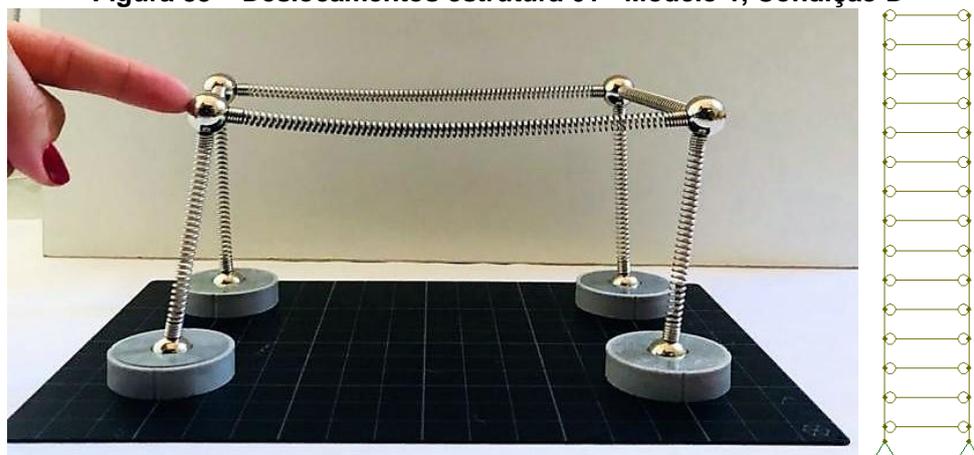
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 82 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 1, Condição C



Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 83 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 1, Condição D



Fonte: Elaboração própria (2020).

Pode-se observar nas figuras grande similaridade no comportamento das deformadas das estruturas no Kit Molas e *no software* Ftool.

Nas situações onde a base do modelo é engastada, Figura 80 e Figura 81, notou-se que a deformação da estrutura começa a acontecer após o primeiro pavimento. A mesma situação não se repete nos protótipos onde a base é rotulada, Figura 82 e Figura 83, onde a deformação se inicia logo após a fundação. Nesses últimos, é possível também observar uma deformada de maior dimensão, o que vai ao encontro aos resultados apresentados em 4.2.

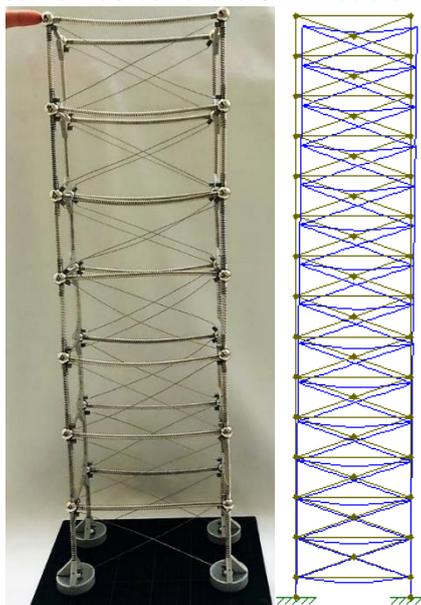
Pôde-se notar ainda, que as ligações rígidas, 2.2.2.4, conferem à base da estrutura uma rigidez muito similar ao que acontece no programa Ftool, uma vez que, visualmente observou-se que a peça “trava” a mola que representa o pilar.

Na Figura 83 não foi possível relacionar a deformada encontrada no Kit Molas com a deformada resultando da análise computacional, pois o *software* não rodou a análise da estrutura, visto que esta ser hipoestática, indo ao encontro dos resultados apresentados no Gráfico 1.

b) Modelo 2 – Contraventamento contínuo em X:

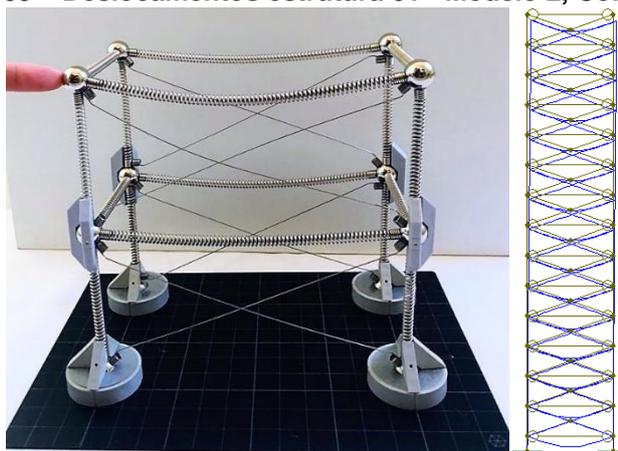
De uma maneira geral esse modelo apresentou deformadas bem menores quando comparado aos outros modelos, como pode-se observar na Figura 84, Figura 85, Figura 86 e Figura 87.

Figura 84 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 2, Condição A



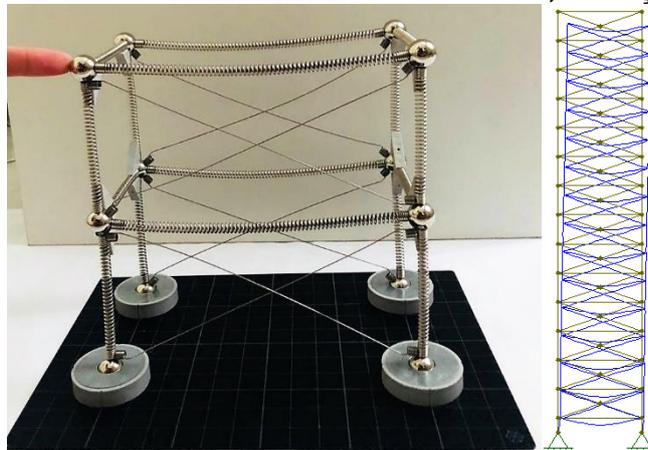
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 85 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 2, Condição B



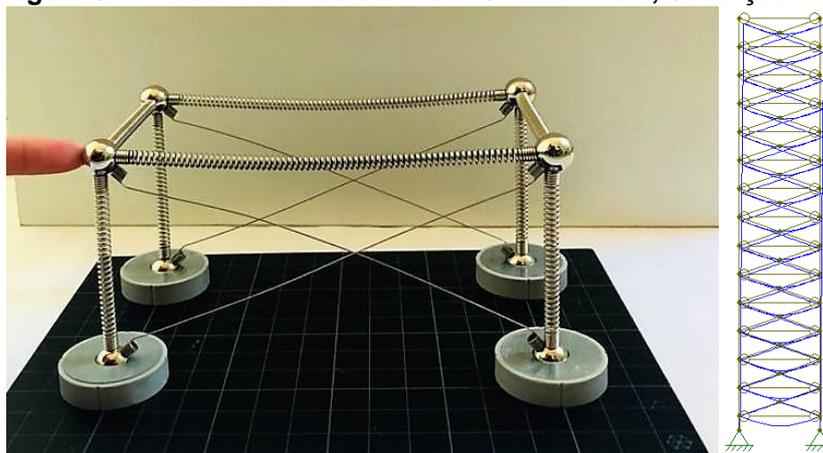
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 86 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 2, Condição C



Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 87 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 2, Condição D



Fonte: Elaboração própria (2020).

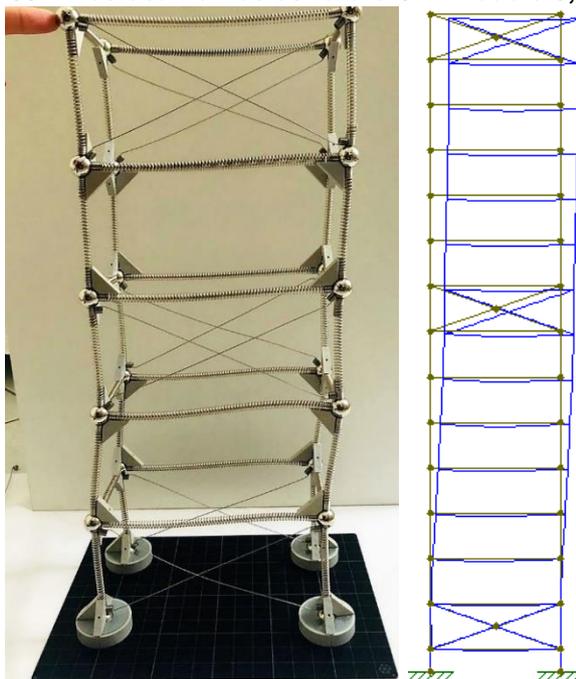
Observou-se grande similaridade entre o comportamento das deformadas do modelo qualitativo e do Ftool, uma vez que, as deformadas observadas visualmente no modelo físico foram praticamente nulas e o deslocamento numérico medido no *software* também ficou próximo de zero.

Outro ponto que chamou atenção neste modelo foi a deformada gerada na viga do último pavimento da maquete. Principalmente, nas condições A e B, apresentadas Figura 84 e Figura 85, onde foi possível notar a flecha gerada pela deformação da viga, situação que também ocorre no modelo deformado gerado pelo programa Ftool.

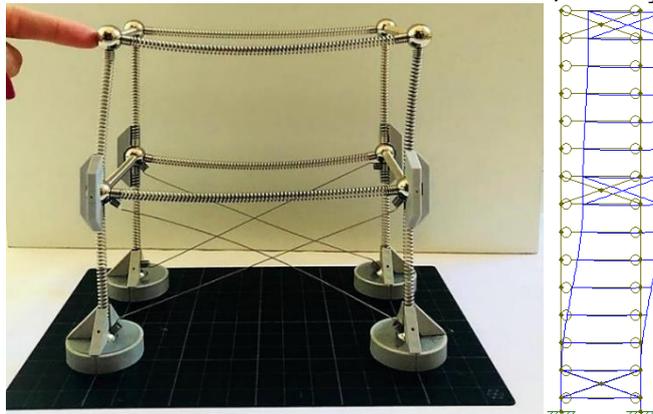
c) Modelo 3 – Contraventamento alternado em X:

O modelo 3 representa as estruturas com contraventamento alternado em X, as maquetes são apresentadas na Figura 88, Figura 89, Figura 90 e Figura 91.

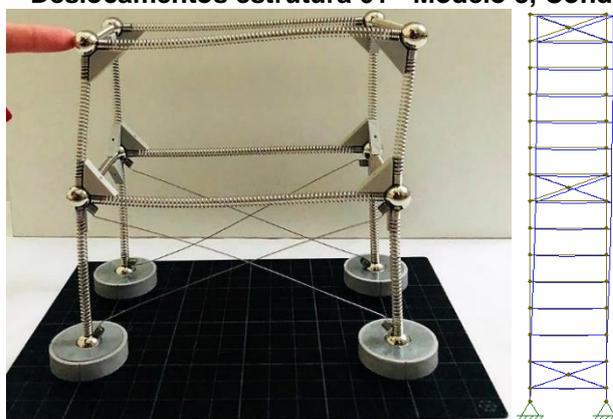
A ideia do contraventamento alternado consiste em distribuir o contraventamento em X pela altura da estrutura de maneira que não comprometa toda a fachada da edificação assim, colocou-se um sistema no primeiro pavimento, um sistema no meio da estrutura e outro no topo dela, tanto no modelo qualitativo, quanto no modelo computacional.

Figura 88 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 3, Condição A

Fonte: Elaboração própria (2020).

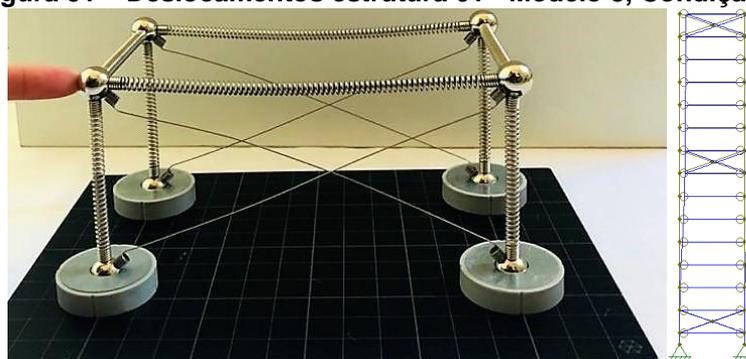
Figura 89 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 3, Condição B

Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 90 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 3, Condição C

Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 91 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 3, Condição D



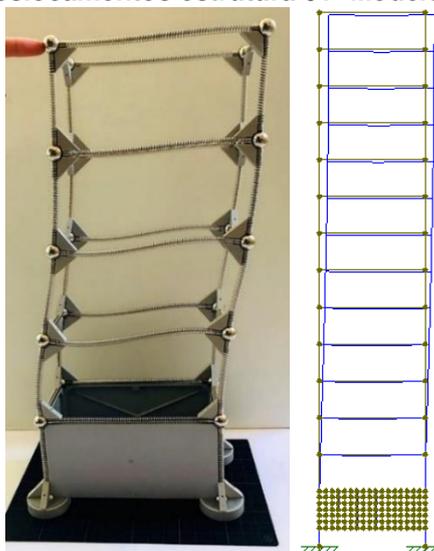
Fonte: Elaboração própria (2020).

Assim como no Modelo 2, neste modelo observou-se grande similaridade entre as deformadas do modelo físico e do modelo computacional. Na Figura 88 e na Figura 89, no primeiro e segundo pavimento fica muito evidente como os dois modelos apresentam o mesmo comportamento uma vez que, ambos apresentaram uma deformada praticamente nula no primeiro pavimento e em seguida, no segundo já se mostraram mais deformadas.

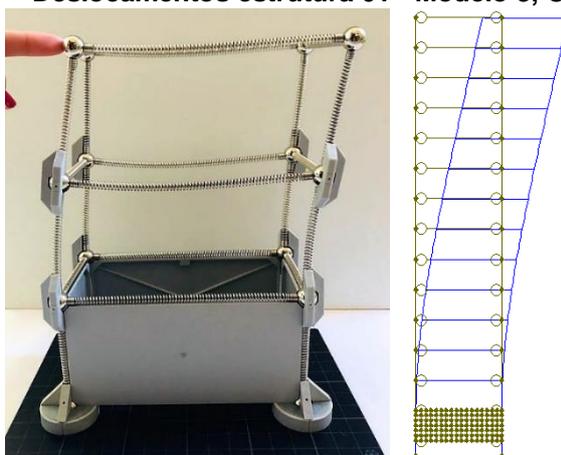
d) Modelo 4 – Contraventamento com parede estrutural:

Dando continuidade à apresentação dos protótipos qualitativos e computacionais com suas respectivas deformadas, apresenta-se na Figura 92, Figura 93, Figura 94 e Figura 95 os modelos com contraventamento do tipo parede estrutural.

Figura 92 – Deslocamentos estrutura 01- Modelo 4, Condição A



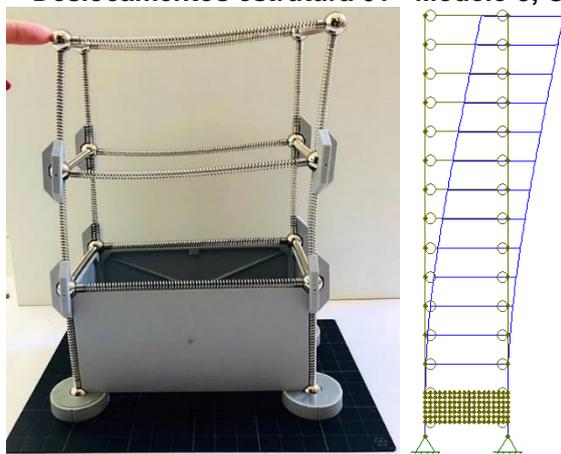
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 93 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 3, Condição B

Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 94 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 3, Condição C

Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 95 – Deslocamentos estrutura 01 - Modelo 3, Condição D

Fonte: Elaboração própria (2020).

Através dos modelos construídos com o auxílio do Kit Molas pôde-se observar a eficiência apresentada por este sistema estrutural de contraventamento.

Por meio da análise visual notou-se grande similaridade e uma equivalência entre os comportamentos dos modelos qualitativos e computacionais, como por exemplo na Figura 93, onde a repetição do comportamento é muito evidente entre as duas análises. O pavimento térreo apresenta um deslocamento praticamente nulo e no topo da estrutura é possível observar o deslocamento do modelo sem que haja deformação visível dos elementos estruturais.

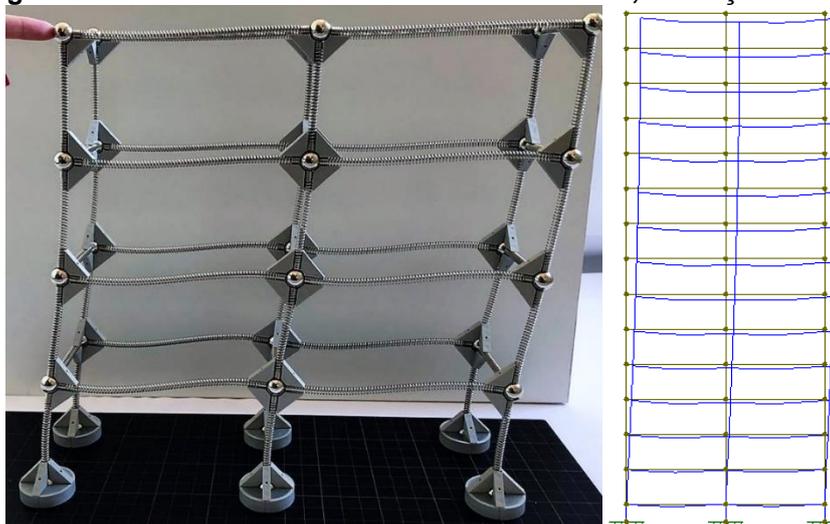
4.3.2 Estrutura hipotética 02

Na sequência, serão apresentadas as Figuras das maquetes montadas para a estrutura hipotética 02. Os mesmos pontos observados na estrutura hipotética 01, 4.3.1, foram observados neste capítulo.

a) Modelo 1 – Sem contraventamento:

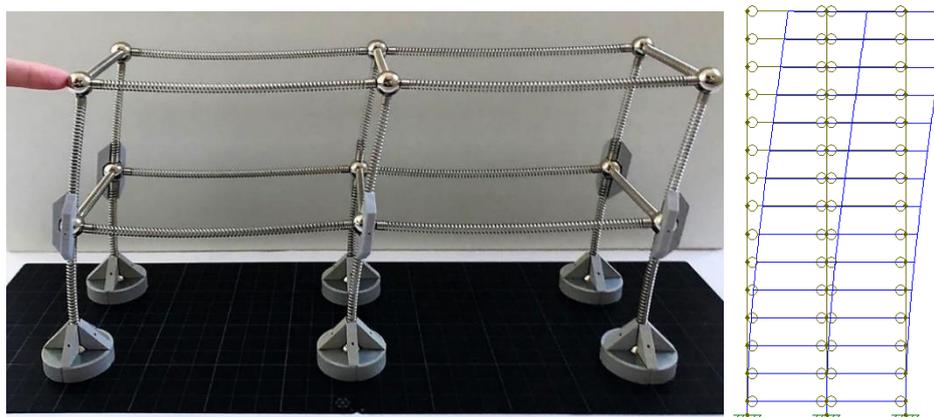
Neste tópico, será apresentado o modelo 1, que representa as estruturas sem contraventamento. As maquetes são apresentadas na Figura 96, Figura 97 e Figura 98.

Figura 96 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 1, Condição A



Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 97 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 1, Condição B



Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 98 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 1, Condição C



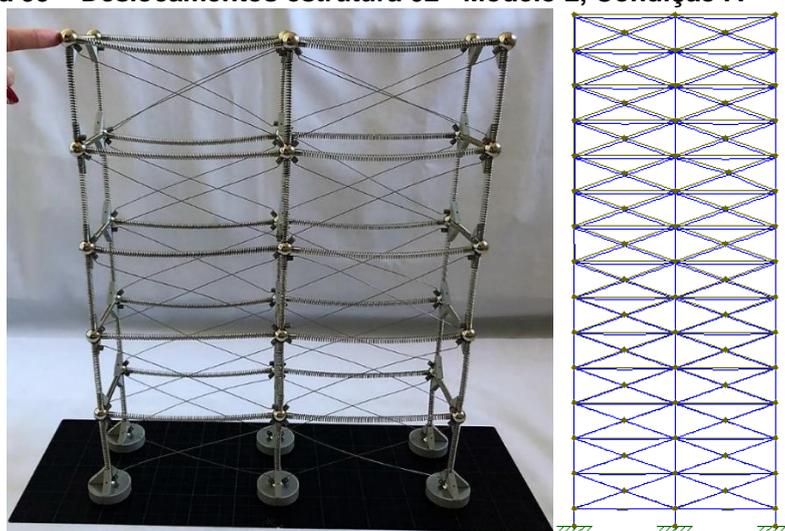
Fonte: Elaboração própria (2020).

Neste modelo não foi possível registrar a estrutura na condição D com a aplicação do carregamento horizontal, visto que o modelo se mostrou muito frágil e com apenas um toque veio a ruína. Essa fragilidade confirmou-se nos ensaios computacionais, uma vez que, o programa Ftool não realizou a análise do modelo, justificando grande instabilidade na estrutura.

b) Modelo 2 – Contraventamento contínuo em X:

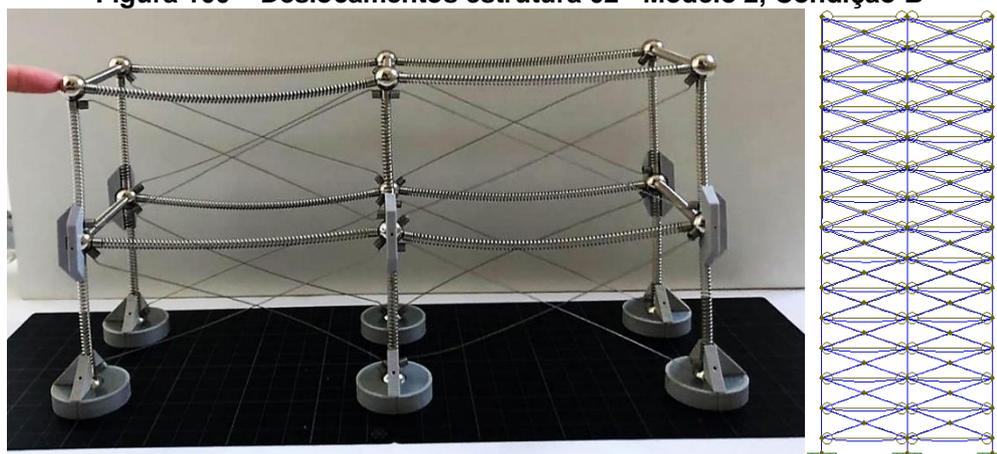
Na sequência tem-se o Modelo 2, nas condições A,B, C e D, apresentados em Figura 99, Figura 100, Figura 101 e Figura 102.

Figura 99 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 2, Condição A



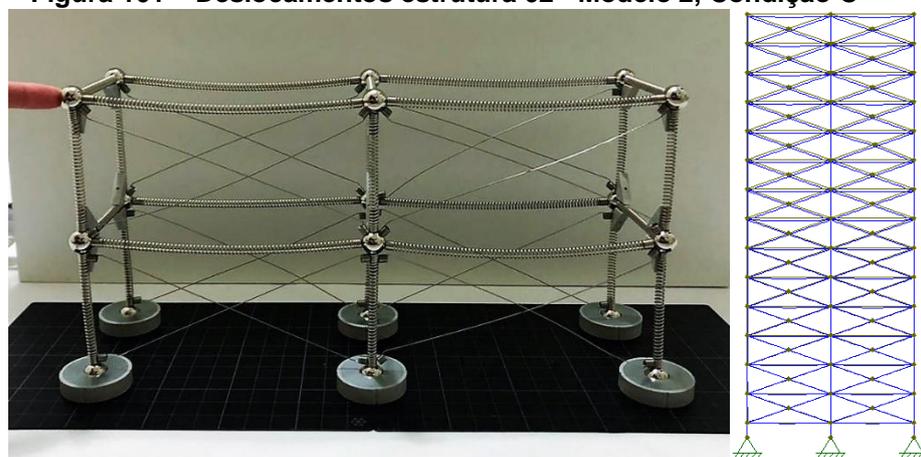
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 100 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 2, Condição B



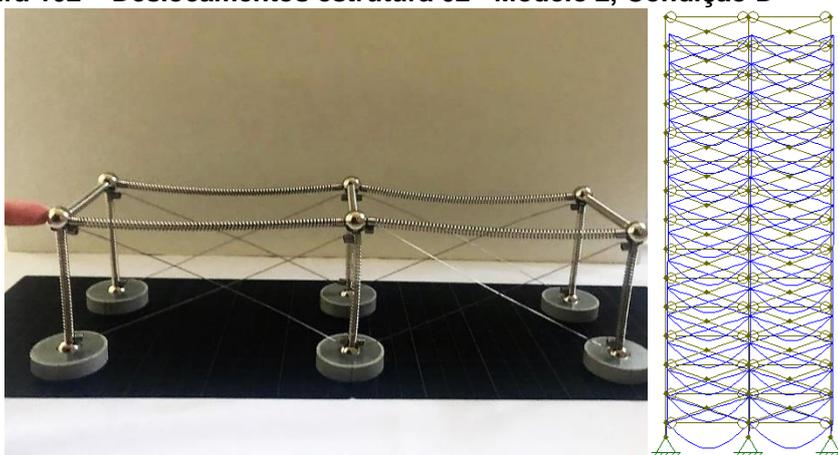
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 101 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 2, Condição C



Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 102 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 2, Condição D



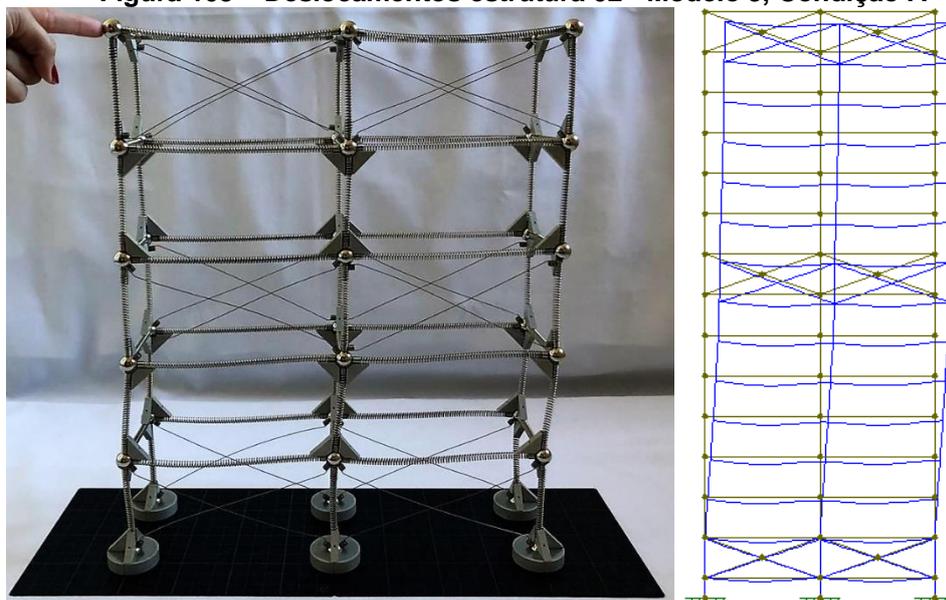
Fonte: Elaboração própria (2020).

O modelo 2 apresentou pequenas deformadas tanto no modelo físico quanto no modelo computacional. Com exceção da Figura 102, a qual na imagem gerada pelo Ftool apresentou grandes deformações nas vigas, situação que em contrapartida não foi observada com tanta intensidade no protótipo.

c) Modelo 3 – Contraventamento alternado em X:

Na Figura 103, Figura 104, Figura 105 e Figura 106 tem-se os Modelos 3 da estrutura hipotética 02.

Figura 103 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 3, Condição A



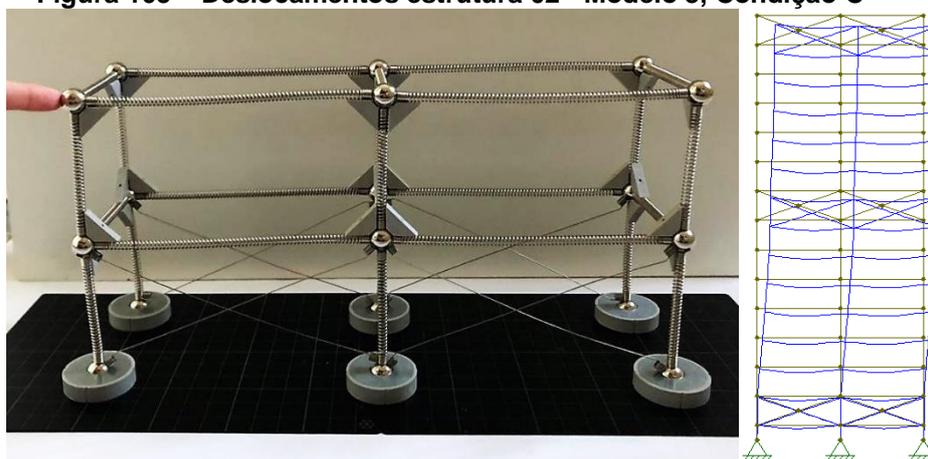
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 104 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 3, Condição B



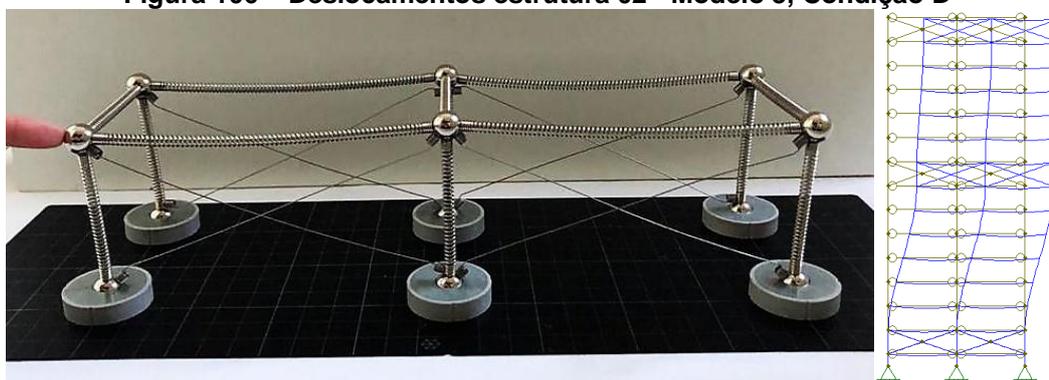
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 105 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 3, Condição C



Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 106 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 3, Condição D



Fonte: Elaboração própria (2020).

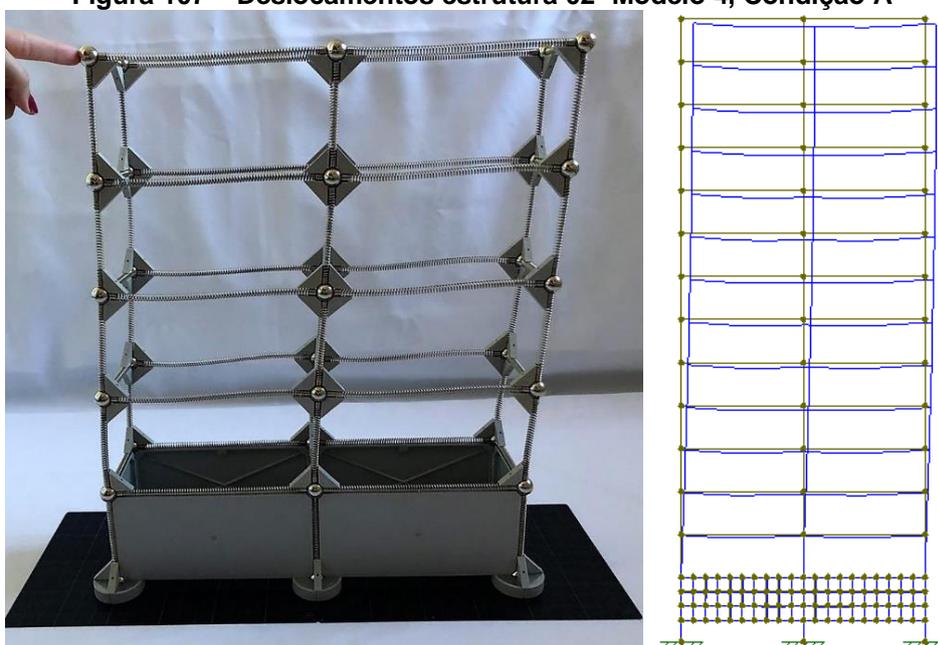
Neste modelo 3 também se notou uma grande correspondência entre os comportamentos das deformadas na análise qualitativa e na análise computacional.

No entanto, observou-se no modelo deformado gerado pelo Ftool, uma flexão nas vigas que não é possível notar no modelo qualitativo.

d) Modelo 4 – Contraventamento com parede estrutural:

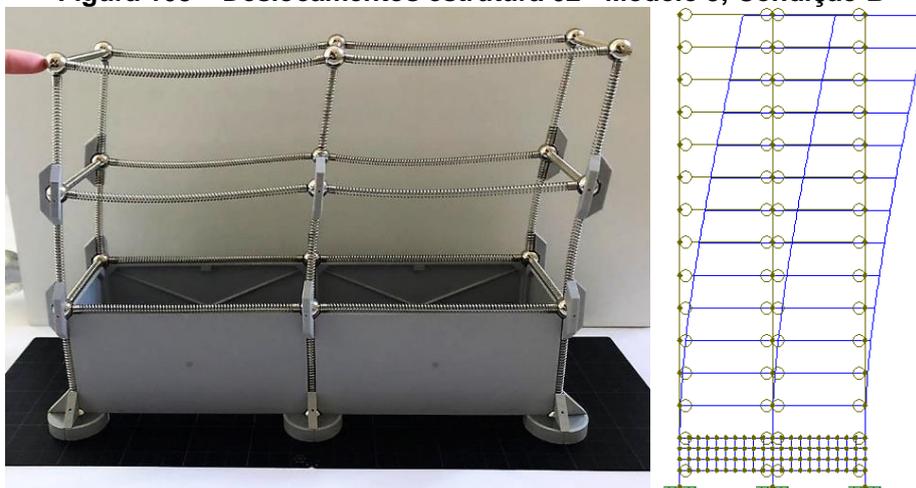
Por fim, na Figura 107, Figura 108, Figura 109 e Figura 110 são apresentados os protótipos do modelo 4 com seus respectivos modelos computacionais.

Figura 107 – Deslocamentos estrutura 02- Modelo 4, Condição A



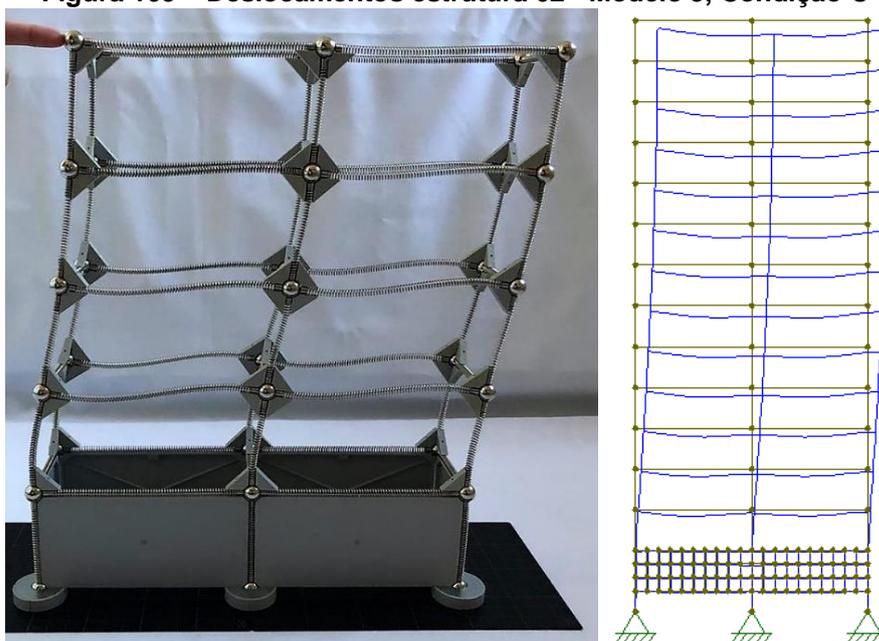
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 108 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 3, Condição B



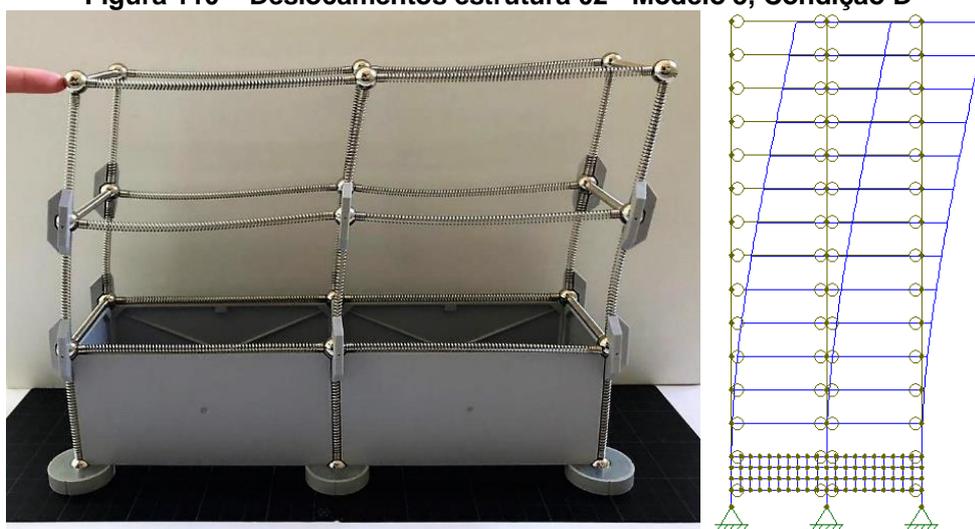
Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 109 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 3, Condição C



Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 110 – Deslocamentos estrutura 02 - Modelo 3, Condição D



Fonte: Elaboração própria (2020).

Outra situação que ficou bem perceptível foi a semelhança na configuração da deformada apresentada pelas estruturas que possuem seus elementos engastados e seus elementos rotulados, quando comparadas as estruturas de mesma vinculação da análise numérica. Em situações onde os elementos são rotulados, o momento fletor tem seu valor igual a zero, em compensação, o mesmo não ocorre em situações onde os elementos estruturais são engastados, visto que nessas situações há momento fletor e esforços cortantes, fazendo com que a estrutura se deforme em um ângulo variável por toda sua altura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fim de alcançar o objetivo desta pesquisa, selecionaram-se alguns modelos estruturais e incluíram-se neles sistemas de contraventamento. Os protótipos definidos neste trabalho de conclusão de curso foram construídos com o auxílio do modelo qualitativo Kit Molas e foram modelados no *software* computacional Ftool, visando relacionar o comportamento das deformadas dos sistemas estruturais em ambas as situações.

Realizaram-se as etapas descritas no método e assim, calcularam-se as ações do vento atuantes sobre as duas estruturas hipotéticas, obtendo então os deslocamentos horizontais em cada nível dos modelos, para assim determinar o valor do coeficiente γ_z . Esses resultados possibilitaram a realização de um estudo acerca da estabilidade global.

Na sequência, relacionou-se o comportamento das deformadas encontradas nos modelos computacionais com as deformadas dos modelos qualitativo. Os resultados mostraram comportamentos semelhantes, podendo concluir que as análises qualitativas permitiram uma percepção prévia da estrutura antes mesmo de realizar as análises numéricas, que são mais complexas quando comparadas com a primeira.

Foi possível determinar ainda os arranjos estruturais de contraventamento mais eficientes para os modelos. Notou-se na análise qualitativa o benefício trazido pelo uso dos contraventamento, em especial o contraventamento contínuo em X, o qual possibilitou a construção de um modelo com um maior número de pavimentos, um deslocamento reduzido e uma deformada quase que imperceptível.

O uso das paredes estruturais também chamou a atenção. A inclusão do sistema tornou possível a construção de uma estrutura com um maior número de pavimentos no modelo qualitativo e apresentou ainda uma deformada mais sutil, quando comparada ao protótipo sem contraventamentos. Estes resultados mostraram-se interessantes visto que, por conveniência, normalmente este sistema é desconsiderado nas análises numéricas. No entanto, quando levado em consideração, contribui positivamente para a redução dos deslocamentos horizontais

no topo da edificação. No caso da Estrutura hipotética 01, observou-se uma redução de 15,8% nos deslocamentos horizontais do modelo 4 comparado ao modelo 1 (este último sem sistema de contraventamento), e para a Estrutura hipotética 02 a redução foi em torno de 16,7%.

Na sequência calcularam-se o coeficiente γ_z das estruturas estudadas. Com este parâmetro e com os deslocamentos horizontais obtidos, pode-se confirmar o que havia sido constatado durante a análise qualitativa com o auxílio do Kit Molas. Os valores numéricos foram de encontro à análise qualitativa, uma vez que, o comportamento observado no Kit Molas repetiu-se nas análises numéricas.

Assim, os resultados obtidos no decorrer desta pesquisa foram considerados satisfatórios uma vez que, o comportamento das deformadas dos modelos qualitativos assemelhou-se ao comportamento das deformadas dos modelos numéricos. Dessa forma, valida-se a eficiência das análises qualitativas como uma pré análise numérica, uma vez que estas auxiliam os projetistas na concepção estrutural mais adequada para a sua edificação e os abstêm de inúmeras e repetidas análises numéricas, já que estas mostram-se mais complexas quando comparadas às qualitativas.

Considerando-se a eficiência observada no uso das paredes estruturais, sugere-se para trabalhos futuros um estudo numérico comparativo entre dois projetos estruturais, o primeiro deles utilizando as paredes estruturais como sistemas de contraventamento e o segundo desconsiderando o sistema.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Models of concrete structures – state of the art – ACI 444R – 79**. ACI, 1987.

ARCHDAILY. **Kit Estrutural Molas 3**. 2019. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/917322/kit-estrutural-mola-3-e-lancado-em-campanha-de-financiamento-coletivo>>. Acesso em: 14 nov. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: Moderna, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações — Procedimento. Rio de Janeiro: Moderna, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro: Moderna, 2003.

BARBOSA, Felipe Augusto da Silva. **ANÁLISE QUALITATIVA DE ESTRUTURAS DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO UTILIZANDO O MODELO ESTRUTURAL MOLA JOÃO PESSOA 2016**. 2016. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

BASTOS, P. S. S. **Pilares em Concreto Armado – Notas de Aula**. 2005. UNESP.

BROHN, David. *Understanding structural analysis*. 3rd ed. London: New Paradigm

BUENO, Mônica Maria Emerenciano. **AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE INSTABILIDADE GLOBAL EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

CAMARGO, Rafael Eclache Moreira de. **Contribuição ao estudo da estabilidade de edifícios de andares múltiplos em aço**. 2012. 328 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

CAMICIA, Rodrigo Junior da Motta. **ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL DE EDIFÍCIOS COM MÚLTIPLOS PAVIMENTOS EM CONCRETO ARMADO COM DIFERENTES TIPOS DE LAJES E INCLUSÃO DE NÚCLEOS RÍGIDOS**. 2017. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.

CAMPOÓ, Leandro B.; CORRÊA, Marcio R. S.; RAMALHO, Marcio A.. EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM EM EDIFÍCIOS DE ALVENARIA ESTRUTURAL. **Revista Minerva – Pesquisa & Tecnologia**, São Paulo, v. 2, n. 2, p.173-184, jul. 2005. Disponível em: <[http://www.fipai.org.br/Minerva%2002\(02\)%2007.pdf](http://www.fipai.org.br/Minerva%2002(02)%2007.pdf)>. Acesso em: 14 nov. 2019.

CARMO, R. M. S. (1995). **Efeitos de segunda ordem em edifícios usuais de concreto armado**. 112p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

CHAVES, José Roberto Ferreira. **ANÁLISE DINÂMICA DE PÓRTICOS METÁLICOS CONTRAVETADOS**. 2009. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

CHINEM, Rodolpho Mendonça. **AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE GLOBAL DE EDIFÍCIOS**. 2010. 97 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de, Goiânia, 2010.

COSTA, Cristina Margarida Rodrigues. **Análise numérica e experimental do comportamento estrutural de pontes em arco de alvenaria de pedra**. 2009. 618 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2009.

COUNCIL ON TALL BUILDINGS AND URBAN HABITAT. **Structural systems for tall buildings**. New York: McGraw-Hill, 1995. 422 p. Departamento de Engenharia Civil. Bauru. 2005.

DIAS, R. H. **Importância e interferências da concepção dos subsistemas verticais em edifícios altos na Arquitetura**. *Arquitextos*, São Paulo, v. 055, Texto especial 270, dezembro, 2004.

DIAS, Ricardo Henrique. **Análise Numérica de Pavimentos em Edifícios em Lajes Nervuradas**. 2003. 455 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

DUARTE, Mariana M. **MAQUETES ESTRUTURAIS COMO AUXÍLIO NO PROCESSO DE ENSINO E APRENDIZAGEM DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL ATRAVÉS DE ANÁLISE QUALITATIVA**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 38., 2010, Fortaleza. **Anais...** . Fortaleza: Abenge, 2010. p. 1 - 8.

ENCONTRO DE PROFESSORES DE ESTRUTURA PARA ESCOLAS DE ARQUITETURA, 1., 1974, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Ed. FAU USP, 1974. Organizado pela Associação Brasileira de Escolas de Arquitetura.

ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE ESTRUTURAS EM ESCOLAS DE ARQUITETURA, 3., 2017, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: Enea, 2017. 14 p.

ENGEL, H. **Sistemas Estruturais**. Editora Gustavo Gili AS, Barcelona. 2002.

FACHIN, Odília. **Fundamentos de Metodologia**. 3ª ed. São Paulo: Saraiva, 2001.

FAKURY, Ricardo Hallal. **COMPORTAMENTO DAS ESTRUTURAS TUBULARES DE EDIFÍCIOS ALTOS SOB CARREGAMENTO LATERAL**. 1986. 338 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1986.

FRANCA, Marcelo Pessoa de Aquino. **ESTUDO DA EFICIÊNCIA DOS CONTRAVENTAMENTOS TRELIÇADOS EM EDIFÍCIOS COM ESTRUTURA DE AÇO**. 2003. 349 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HENDRY, A. W. "Structural Masonry", Second Edition, Macmilan Press Ltd., 1998.

HOSSDORF, Heinz. *Model analysis of structures*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1974.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. **Fundamentos de metodologia científica**. 6. ed. 5. reimp. São Paulo: Atlas, 2007.

LOBOSCO, Tales; CÂMARA, Débora Carvalho. **Desenvolvimento de modelos qualitativos para o ensino de estruturas**. PARC Pesquisa em Arquitetura e

Construção, Campinas, SP, v. 9, n. 3, p. 167-178, set. 2018. ISSN 1980-6809. Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8650263>>. Acesso em: 02 set. 2019.

LORRIGIO, Daniel D. Notas de aula “**Análise Matricial e Modelagem de Estruturas**” do curso de Pós Graduação em Engenharia Civil. UFSC. Florianópolis, 2000.

LUIZ FERNANDO MARTHA (Rio de Janeiro). Departamento de Engenharia Civil da Puc-Rio (org.). **Ftool**. Disponível em: <https://www.ftool.com.br/Ftool/>. Acesso em: 11 ago. 2020.

MARTHA, Luiz Fernando. **Análise de Estruturas: Conceitos e Métodos Básicos**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2011.

MARTINS, A. R. (1990). **TÉCNICA EXPERIMENTAL PARA APLICAÇÃO DE MODELOS DE MICROCONCRETO**. Universidade de São Paulo, EPUSP, São Paulo, Tese de Doutorado, 1990.

MATIAS, I. G. J. **Análise não-linear de estruturas tridimensionais de edifícios altos com núcleos resistentes sobre fundações flexíveis**. 1997. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1997.

MATOS, Rafael Carrijo Barreto de. **SISTEMAS DE CONTRAVENTAMENTOS EM EDIFÍCIOS DE ESTRUTURA METÁLICA**. 2014. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2014.

MELO, Carlos Eduardo Luna de. **ANÁLISE ESTRUTURAL COM O SAP200**. Universidade de Brasília – Brasília, 2016. 49 p.

MELO, Ladislão Roger Ticona. **MONITORAÇÃO DE MODELOS FÍSICOS REDUZIDOS PARA INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS EM ESCALA REAL**. 2011. 261 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MOLA MODEL. **Kit Estrutural Mola 2**. 2019. Disponível em: <<https://molamodel.com/collections/products/products/mola-structural-kit-2>>. Acesso em: 14 nov. 2019.

MONCAYO, Winston Junior Zumaeta. **Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado**. 2011. 221 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

OLIVEIRA, Márcio Sequeira de. **MODELO ESTRUTURAL QUALITATIVO PARA PRÉ- AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS**. 2008. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

OLIVEIRA, Márcio Sequeira de; LEITE, Maria Amélia Devitte Ferreira D'azeedo; REBELLO, Yopnan Conrado Pereira. **Kit Estrutural Mola 1**. 2019. Disponível em: <<https://molamodel.com/products/mola-structural-kit-1>>. Acesso em: 14 set. 2019.

PEREIRA, Ana Claudia de Oliveira. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MODELAGEM ESTRUTURAL DO NÚCLEO NOS PAINÉIS DE CONTRAVENTAMENTOS DE EDIFÍCIOS ALTOS**. 2000. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

PEREIRA, Gustavo Souza. **CONTRIBUIÇÕES À ANÁLISE DE ESTRUTURAS DE CONTRAVENTAMENTO DE EDIFÍCIOS EM CONCRETO ARMADO**. 1997. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. D. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013. 277 p.

PUEL, André. **MODELAGEM DE LAJES PLANAS SIMÉTRICAS E ASSIMÉTRICAS EM CONCRETO ARMADO – ANÁLISE INTEGRADA LAJE X PILAR**. 2009. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

RATTICHERI, Maurício Massaroppi. **METODOLOGIA CONSTRUTIVA DE PAREDES DIAFRAGMA**. 2015. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

REBELLO, Yopnan C. P. **Contribuição ao ensino de estrutura nas escolas de arquitetura**. 1992. 107p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

REIS, Eduardo Martins dos. **ANÁLISE DE PAVIMENTOS DE EDIFÍCIOS UTILIZANDO A ANALOGIA DE GRELHA**. 2007. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina - Ufsc, Florianópolis, 2007.

RIBEIRO, Jairo Fonseca. **ESTABILIDADE GLOBAL EM EDIFÍCIOS: ANÁLISE DOS EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO**. 2010. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RODRIGUES, Hugo. **Análise de estruturas 3D com o programa SAP2000 – V11.0.4**. 2008. 35p.

SANTOS, Luciano Ferreira. **SISTEMAS DE CONTRAVENTAMENTO APLICADOS EM ESTRUTURAS PRÉ- MOLDADAS DE CONCRETO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS**. 2015. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

SCHWARK, Martin Paul. ***Sugestões para um curso intuitivo de teoria das estruturas***. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

SICILIANO, Paulo Cesar. **Sistematização Filosófica – Processo de Aprendizagem**. In: Silva, Edna Lúcia. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**/Edna Lúcia da Silva, Estera Muszkat Menezes. – 4. ed. rev. atual. – Florianópolis: UFSC, 2005. 138p. Solutions, 2005.

SILVA, Renata Gomes Lanna da. **Avaliação dos efeitos de 2ª ordem em edifícios de aço utilizando métodos aproximados e análise rigorosa**. 2004. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

STRAUSS, A.; CORBIN, J. **Pesquisa Qualitativa: técnicas e procedimentos para o desenvolvimento de teoria fundamentada**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2008. 288 p.

TÉCHNE. **Sistemas Construtivos, Paredes Diafragma**. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/182/artigo286914-3.aspx>>. Acesso em: 23 de novembro de 2019.

VALANDRO, Amanda; TROMBETTA, DÂmaris Thaise. **ESTABILIDADE GLOBAL DE EDIFÍCIOS – APLICAÇÃO DO PARÂMETRO DE INSTABILIDADE α E**

PROCESSO P-DELTA. 2016. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016.

WORDELL, Fernando. **Avaliação da Instabilidade Global em Edifícios Altos.** 2003. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ZANELLA, L. C. H. **Metodologia de Pesquisa.** 2. ed. Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração/UFSC, 2011. 134 p.