

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Otimização Multiobjetivo de *Outriggers* em Edifícios
Altos Submetidos a Cargas de Vento**

Felipe Morrone Barbat Parfitt

Porto Alegre
2022

FELIPE MORRONE BARBAT PARFITT

**OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DE *OUTRIGGERS* EM
EDIFÍCIOS ALTOS SUBMETIDOS A CARGAS DE VENTO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Porto Alegre
2022

CIP - Catalogação na Publicação

Parfitt, Felipe Morrone Barbat
Otimização Multiobjetivo de Outriggers em Edifícios
Altos Submetidos a Cargas de Vento / Felipe Morrone
Barbat Parfitt. -- 2022.
121 f.
Orientadores: Herbert Martins Gomes, Inácio
Benvegnu Morsch.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,
BR-RS, 2022.

1. outtrigger. 2. edifícios altos. 3. otimização
estrutural. 4. programação inteira. 5. carga lateral.
I. Gomes, Herbert Martins, orient. II. Morsch, Inácio
Benvegnu, orient. III. Título.

FELIPE MORRONE BARBAT PARFITT

**OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DE *OUTRIGGERS* EM
EDIFÍCIOS ALTOS SUBMETIDOS A CARGAS DE VENTO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, na área de concentração Estruturas, e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 1 de abril de 2022

Prof. Herbert Martins Gomes
Dr. pela UFRGS
Orientador

Prof. Inácio Benvegno Morsch
Dr. pela UFRGS
Orientador

Lucas Festugato
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Afonso Celso de Castro Lemonge (UFJF)
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Marcelo Maia Rocha (UFRGS)
Dr. techn., Universität Innsbruck, Áustria

Prof. Moacir Kripka (UPF)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Este trabalho é dedicado a todas as pessoas
que contribuíram para torná-lo realidade.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a todos os membros da minha família, em especial, aos meus pais, José e Claire, e aos meus irmãos, Rafael e Gustavo, pelo apoio e incentivo a este trabalho.

Agradeço ao Professor Herbert Martins Gomes pela orientação, por todos os momentos de disponibilidade e pela contribuição fundamental para que este trabalho fosse concluído.

Agradeço ao Professor Inácio Benvegnu Morsch pela orientação e contribuição de seus conhecimentos que foram indispensáveis para a realização deste trabalho.

Agradeço aos professores do PPGECC da UFRGS por contribuírem com seus conhecimentos para a minha formação.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro através da bolsa de estudos para a realização deste trabalho.

RESUMO

PARFITT, F. M. B. **Otimização Multiobjetivo de *Outriggers* em Edifícios Altos Submetidos a Cargas de Vento**. 2022. 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Dentre os diversos sistemas estruturais empregados para mitigar a ação de cargas laterais em edifícios altos, o sistema conhecido como *outrigger* (OR) é um dos mais empregados e eficientes. O *outrigger* é um elemento horizontal rígido que possui a função de realizar a conexão entre o núcleo interno e as colunas perimetrais, acrescentando rigidez e capacidade de resistência lateral à estrutura. Outro elemento que pode ser adicionado a este sistema é o *belt-truss* (BT) que, ao unir as colunas perimetrais, auxilia a aumentar ainda mais ambos os aspectos citados. Em relação ao projeto de edifícios altos, existem dois critérios que são de extrema relevância à medida que a estrutura aumenta de altura: o máximo deslocamento lateral (MDL) e o momento na base do núcleo (MBN). A posição e a quantidade de ORs/ORs-BTs ao longo da altura afetam diretamente os critérios mencionados. Portanto, conhecer as localizações nas quais o sistema estrutural em estudo possui mais eficiência é uma maneira de contribuir ainda mais para a redução do MDL e do MBN. Ressalta-se que os dois critérios citados conduzem a resultados inversamente proporcionais, levando, assim, a serem objetivos conflitantes. Sendo assim, este trabalho tem por objetivo investigar uma metodologia para a determinação dos pavimentos ótimos ao implementar ORs/ORs-BTs ao longo da altura de um edifício alto para reduzir tanto o MDL da estrutura, quanto o MBN, de forma separada e conjunta. Além disso, analisa-se a influência destes elementos sobre outros critérios como, por exemplo, a máxima aceleração e as frequências naturais. Ao longo do trabalho: (a) verifica-se o comportamento da estrutura quando a relação de rigidez dos principais elementos do sistema de contraventamento (núcleo, colunas perimetrais, OR e BT) são variados; (b) são tratadas discussões sobre a programação com variáveis inteiras, robustez, custo computacional e as soluções ótimas obtidas. Para alcançar o objetivo, um modelo tridimensional de um edifício alto sob ação lateral de vento é analisado, empregando o método dos elementos finitos através do *software* comercial ANSYS. As otimizações mono e multiobjetivo foram resolvidas, respectivamente, pelo método Nelder-Mead modificado pelo autor e pela função de utilidade. Diante dos resultados, conclui-se que ao introduzir ORs/ORs-BTs em edifícios altos a influência na redução dos objetivos mencionados é extremamente relevante, podendo chegar a 68% para o MBN e 71% para o MDL, dependendo da quantidade que são empregados.

Palavras-chave: *outrigger*, edifícios altos, otimização estrutural, programação inteira, carga lateral.

ABSTRACT

PARFITT, F. M. B. **Otimização Multiobjetivo de *Outriggers* em Edifícios Altos Submetidos a Cargas de Vento**. 2022. 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Among the several structural systems used to mitigate the action of lateral loads in tall buildings, the system known as outrigger (OR) is one of the most used and efficient. The outrigger is a rigid horizontal element that has the function of perform the connection between the inner core and the perimeter columns, adding stiffness and so lateral strength to the structure. Another element that can be added to this system is the belt-truss (BT) that, by uniting the perimeter columns, both aspects cited are improved. Regarding the design of tall buildings, there are two criteria that are extremely relevant as the structure height increases: maximum lateral drift (MLD) and core base moment (CBM). The position and number of ORs/ORs-BTs throughout the height directly affect both aforementioned criteria. Therefore, knowing the locations in which the structural system under study is most efficient is a way to minimize even more the MLD and CBM. On the other hand, each criterion can conduct to different OR optimal positions, thus leading to conflicting objectives. This work aims to investigate a methodology for determining the optimal ORs/ORs-BTs floors along the height of a tall building to reduce both the structure's MLD and CBM, separately and jointly. In addition, the influence of these elements on other criteria, such as maximum acceleration and natural frequencies, is analyzed. Throughout the work: (a) the behavior of the structure is verified when the stiffness ratio of the main elements used in the bracing system (core, perimeter columns, OR and BT) are varied; (b) discussions on the integer programming, robustness, computational cost and obtained optimum solutions are dealt. In order to achieve this objective, a three-dimensional model of a tall building under lateral wind action is analyzed, using the finite element method through the commercial software ANSYS. The mono and multi-objective optimizations were solved, respectively, by Nelder-Mead method with author's modifications and by utility function. Based on the results, it could be concluded that by introducing ORs/ORs-BTs in tall buildings, the influence on the reduction of the mentioned objectives is extremely relevant, reaching 68% for the MBN and 71% for the CDM, depending on the amount used.

Keywords: *outrigger, tall buildings, structural optimization, integer programming, lateral load.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Yachthouse Residence Club sob construção (fonte: Wikipédia (2021)) . . .	21
Figura 2.1 – Os 100 edifícios mais altos por material (fonte: CTBUH (2021) modificado)	25
Figura 2.2 – Prêmio pela altura (fonte: Ali (2001) modificado)	26
Figura 2.3 – Vento nas direções longitudinal e transversal (fonte: Fu (2018) modificado)	28
Figura 2.4 – Perfis de velocidade média para diferentes terrenos (fonte: Mendis et al. (2007) modificado)	28
Figura 2.5 – Formação de vórtices de von Kármán (fonte: Mendis et al. (2007))	29
Figura 2.6 – Efeito de segunda ordem (fonte: Biswas e Peronto (2020) modificado) . .	32
Figura 2.7 – Sistemas estruturais internos (fonte: Ali e Moon (2018) modificado) . . .	36
Figura 2.8 – Elementos do sistema OR (fonte: Gunel e Ilgin (2014) modificado)	40
Figura 2.9 – Interação Núcleo-OR (fonte: Taranath (2009) modificado)	40
Figura 3.1 – Modelo do edifício alto	47
Figura 3.2 – Geometria do SHELL181 (fonte: Ansys (2021))	48
Figura 3.3 – Geometria do BEAM188 (fonte: Ansys (2021))	49
Figura 3.4 – Geometria do LINK180 (fonte: Ansys (2021))	50
Figura 3.5 – Esquema para o modelo dinâmico discreto (fonte: NBR 6123 (1988)) . . .	50
Figura 3.6 – Carga lateral de vento aplicada ao modelo do edifício alto	53
Figura 3.7 – (a) Reflexão (b) Expansão	56
Figura 3.8 – (a) Contração externa (b) Contração interna	57
Figura 3.9 – (a) Redução (b) Dilatação	58
Figura 3.10 – Conceito de dominância para um problema de minimização com duas funções objetivo (fonte: Arroyo (2002) modificado)	65
Figura 4.1 – Modelo numérico em (a) perspectiva (b) planta	67

Figura 4.2 – Diferentes discretizações de malha para o núcleo	68
Figura 4.3 – Estudo de convergência da malha do núcleo em relação ao deslocamento no topo	69
Figura 4.4 – Estudo de convergência da malha do núcleo em relação ao momento na base do núcleo	69
Figura 4.5 – 1° e 2° modo de vibração do edifício alto sem ORs-BTs	70
Figura 4.6 – 3° e 4° modo de vibração do edifício alto sem ORs-BTs	71
Figura 4.7 – 5° e 6° modo de vibração do edifício alto sem ORs-BTs	71
Figura 4.8 – Máximo deslocamento lateral para o modelo sem ORs-BTs (m)	72
Figura 4.9 – Reações do edifício alto submetido ao carregamento lateral de vento . . .	73
Figura 4.10 – Influência da área do OR em relação aos objetivos/critérios analisados . .	74
Figura 4.11 – Influência da área do OR em relação ao pavimento ótimo (máximo deslocamento lateral)	75
Figura 4.12 – Influência da área do OR em relação ao pavimento ótimo (momento na base do núcleo)	76
Figura 4.13 – Influência da área do OR em relação ao pavimento ótimo (frequência natural de flexão)	76
Figura 4.14 – Influência da área do OR em relação ao pavimento ótimo (máxima aceleração)	77
Figura 4.15 – Posição ótima do OR em relação aos objetivos analisados (Área das barras horizontais do OR: $A_{OR} = 0,06 m^2$)	78
Figura 4.16 – Influência da área do BT em relação aos objetivos/critérios analisados . . .	78
Figura 4.17 – Influência da área do BT em relação ao pavimento ótimo (máximo deslocamento lateral)	79
Figura 4.18 – Influência da área do BT em relação ao pavimento ótimo (momento na base do núcleo)	80
Figura 4.19 – Influência da área do BT em relação ao pavimento ótimo (frequência natural de flexão)	80

Figura 4.20 – Influência da área do BT em relação ao pavimento ótimo (máxima aceleração)	81
Figura 4.21 – Influência da relação de rigidez colunas-núcleo sobre os objetivos/critérios analisados	82
Figura 4.22 – Influência da relação de rigidez colunas-núcleo sobre o pavimento ótimo (máximo deslocamento lateral)	83
Figura 4.23 – Influência da relação de rigidez colunas-núcleo sobre o pavimento ótimo (momento na base do núcleo)	83
Figura 4.24 – Influência da relação de rigidez colunas-núcleo sobre o pavimento ótimo (frequência natural de flexão)	84
Figura 4.25 – Influência da relação de rigidez colunas-núcleo sobre o pavimento ótimo (máxima aceleração)	84
Figura 5.1 – Processo de otimização com o algoritmo Nelder-Mead modificado	87
Figura 5.2 – Resultado de cada objetivo de acordo com o número de OR/OR-BT	88
Figura 5.3 – Processo de otimização com e sem a análise não linear geométrica para um OR (MDL)	89
Figura 5.4 – Fronteira de Pareto para 1 e 2 ORs/ORs-BTs	91
Figura 5.5 – Busca exaustiva com 2 ORs (Objetivo: MDL)	92
Figura 5.6 – Busca exaustiva com 2 ORs (Fronteira de Pareto)	93
Figura 5.7 – Busca exaustiva com 2 ORs-BTs (Fronteira de Pareto)	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – <i>Outrigger</i> mais adequado dado uma situação	43
Tabela 3.1 – Parâmetros do algoritmo Nelder-Mead modificado	58
Tabela 3.2 – Resultados do Nelder-Mead original	63
Tabela 3.3 – Resultados do Nelder-Mead modificado	63
Tabela 5.1 – Resultados das otimizações mono-objetivo para o MDL (OR)	86
Tabela 5.2 – Resultados das otimizações mono-objetivo para o MDL (OR-BT)	86
Tabela 5.3 – Resultados das otimizações mono-objetivo para o MBN (OR)	88
Tabela 5.4 – Resultados das otimizações mono-objetivo para o MBN (OR-BT)	88
Tabela 5.5 – Número de posições ótimas conforme a discretização do peso (ORs)	90
Tabela 5.6 – Número de posições ótimas conforme a discretização do peso (ORs-BTs)	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSYS	<i>Analysis Systems Incorporated</i>
APDL	<i>ANSYS Parametric Design Language</i>
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
BT	<i>Belt Truss</i>
BRB	<i>Buckling Restrained Braces</i>
CLA	Camada Limite Atmosférica
CTBUH	<i>Council on Tall Buildings and Urban Habitat</i>
DMI	<i>Drift Measurement Index</i>
HFB	<i>High-Frequency Balance</i>
HFPI	<i>High-Frequency Pressure Integration</i>
MBN	Momento na Base do Núcleo
MDL	Máximo Deslocamento Lateral
NLG	Não linear Geométrica
OR	<i>Outrigger</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

I) LETRAS ROMANAS

a_j	Aceleração no modo j [m/s^2]
A_i	Área de atuação do vento na coordenada i [m^2]
A_0	Área de referência [m^2]
A_{hor}	Área da barra horizontal do OR [m^2]
A_{diag}	Área da barra diagonal do OR [m^2]
A_v	Área da viga [m^2]
A_{BT}	Área da barra do <i>belt-truss</i> [m^2]
b, q	Parâmetros de correção conforme a categoria de rugosidade [adm]
c_n	Coefficiente redutor [adm]
c_d	Coefficiente de dilatação [adm]
C_{ai}	Coefficiente de arrasto na coordenada i [adm]
$d\omega$	Discretização de peso [adm]
D_1, D_2	Componentes horizontais da deformação [adm]
D_3, D_4	Componentes verticais da deformação [adm]
E	Módulo de elasticidade [MPa]
f	Frequência natural da estrutura [Hz]
$\mathbf{f}(\mathbf{x})$	Vetor de funções objetivo [adm]
$f_1(\mathbf{x})$	Função objetivo do máximo deslocamento lateral [adm]
$f_2(\mathbf{x})$	Função objetivo do momento na base do núcleo [adm]
F_H	Força referente à parcela flutuante [N]
F_z	Força pontual em z [N]
$g_i(\mathbf{x})$	Função das restrições de desigualdades [adm]
h	Distância vertical entre pavimentos [m]

$h_j(\mathbf{x})$	Função das restrições de igualdades [adm]
h_{or}	Altura do <i>outrigger</i> [m]
H	Altura do edifício [m]
I_{cols}	Momento de inércia de área das colunas em relação ao centro geométrico do modelo [m^4]
I_{nuc}	Momento de inércia de área do núcleo em relação ao centro geométrico do modelo [m^4]
k	Número de restrições de igualdades [adm]
lhs	Variável aleatória definida pela amostragem por hipercubo latino [adm]
l_j	Limites inferiores [adm]
l_1	Dimensão horizontal de uma edificação perpendicular à direção do vento [m]
l_2	Dimensão de uma edificação na direção do vento [m]
L	Dimensão característica [m]
m	Número de funções objetivo [adm]
m_i	Massa discreta na coordenada i [kg]
m_0	Massa arbitrária de referência [kg]
M_{base}	Momento na base do núcleo [MN.m]
M_x	Momento em torno de x [MN.m]
M_y	Momento em torno de y [MN.m]
n	Número de variáveis de projeto [adm]
N_p	Quantidade de fatores peso [adm]
p	Número de restrições de desigualdades [adm]
\bar{q}_0	Pressão na altura de referência [N/m^2]
Q	Coefficiente de estabilidade [adm]
\hat{Q}	Parâmetro combinatório resultante [variável]
\mathbf{R}_{normal}	Vetor contendo amostras de uma distribuição normal padrão [adm]

R_{rig}	Relação de rigidez colunas-núcleo [adm]
S	Espaço de projeto viável [adm]
St	Número de Strouhal [adm]
S_1	Fator de correção topográfico [adm]
S_3	Fator de correção probabilístico [adm]
t	Espessura [m]
u_j	Limites superiores [adm]
\hat{u}_j	Deslocamento flutuante no modo j [m]
V_{cr}	Velocidade crítica de vento [m/s]
\bar{V}_p	Velocidade de projeto [m/s]
V_0	Velocidade básica do vento [m/s]
\mathbf{x}	Variáveis de projeto [adm]
$\bar{\mathbf{x}}$	Centroide das partículas [adm]
\mathbf{x}_c	Variáveis de projeto da operação de contração [adm]
\mathbf{x}_e	Variáveis de projeto da operação de expansão [adm]
\mathbf{x}_r	Variáveis de projeto da operação de reflexão [adm]
x_i	Modo de vibração na coordenada i [adm]
$x_{i,min}$	Limites inferiores [adm]
$x_{i,max}$	Limites superiores [adm]
X_i	Coordenada horizontal i do vértice de um ambiente ($i = A, B, C, D$) [m]
\bar{X}_i	Força média de vento na coordenada i [N]
\hat{X}_i	Força flutuante de vento na coordenada i [N]
\tilde{X}_i	Força total de vento na coordenada i [N]
Y_i	Coordenada vertical i do vértice de um ambiente ($i = A, B, C, D$) [m]
z_i	Altura na coordenada i [m]
z_o	Comprimento de rugosidade [adm]

z_r	Altitude de referência [m]
\mathbf{Z}	Espaço de critério viável [adm]
\mathbb{Z}^n	Conjunto de variáveis inteiras [adm]

II) LETRAS GREGAS

α	Coeficiente de reflexão [adm]
β	Coeficiente de expansão [adm]
β_i	Parâmetro auxiliar na coordenada i [adm]
γ_e	Coeficiente de contração externa [adm]
γ_i	Coeficiente de contração interna [adm]
δ_n	Deslocamento horizontal no pavimento n [cm]
δ_{n-1}	Deslocamento horizontal no pavimento $n - 1$ [cm]
Δ_{pav}	Razão de deslocamento entre pavimentos [adm]
Δ_{roto}	Máximo deslocamento lateral [m]
Δ_1	Deslocamento de primeira ordem [m]
Δ_2	Deslocamento de segunda ordem [m]
ν	Coeficiente de Poisson [adm]
ξ	Coeficiente de amplificação dinâmica [adm]
ψ_i	Razão entre massas na coordenada i [adm]
ω	Fator peso [adm]
Ω	Vetor fator peso [adm]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVOS	22
1.1.1	Objetivo principal	22
1.1.2	Objetivos secundários	22
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	EDIFÍCIOS ALTOS	24
2.1.1	Carregamentos laterais	26
2.1.1.1	Vento	27
2.1.2	Considerações de projeto	31
2.1.2.1	Critérios de projeto	31
2.1.2.2	Modelagem e análise estrutural	33
2.2	SISTEMAS DE CONTRAVENTAMENTO	35
2.2.1	<i>Outriggers</i>	37
2.2.1.1	Considerações de projeto	40
2.2.1.2	Vantagens e desvantagens	42
2.2.1.3	Fatores que influenciam o desempenho	43
2.2.1.4	Trabalhos anteriores	43
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	47
3.1	MODELO DO EDIFÍCIO ALTO	47
3.2	<i>SOFTWARE ANSYS</i>	48
3.2.1	Elemento de casca para núcleo	48
3.2.2	Elemento de vigas	49
3.2.3	Elemento de treliça	49
3.3	EFEITOS DINÂMICOS DA TURBULÊNCIA DE VENTO	50

3.3.1	Cálculo da ação do vento segundo a NBR6123/88	52
3.4	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	53
3.4.1	Formulação do problema	53
3.4.2	Otimização mono-objetivo	54
3.4.2.1	Método Nelder-Mead	54
3.4.2.2	Funções <i>benchmark</i>	59
3.4.3	Otimização multiobjetivo	64
3.4.3.1	Método da função de utilidade	65
4	MODELO E ANÁLISE DO EDIFÍCIO ALTO	67
4.1	MODELO NUMÉRICO DO EDIFÍCIO ALTO	67
4.2	ESTUDO DE MALHA DE ELEMENTOS FINITOS	68
4.3	ANÁLISE DO EDIFÍCIO ALTO SEM <i>OUTRIGGER/BELT-TRUSS</i>	70
4.3.1	Análise modal	70
4.3.2	Análise estática	72
4.3.2.1	Máximo deslocamento lateral	72
4.3.2.2	Momento na base do núcleo	73
4.3.2.3	Máxima aceleração	73
4.4	ANÁLISE DO EDIFÍCIO ALTO COM <i>OUTRIGGER/BELT-TRUSS</i>	74
4.4.1	Análise da rigidez do <i>outrigger</i>	74
4.4.2	Análise da rigidez do <i>belt-truss</i>	77
4.4.3	Análise da relação de rigidez colunas-núcleo	81
5	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	86
5.1	RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO MONO-OBJETIVO	86
5.1.1	Máximo deslocamento lateral	86
5.1.2	Momento na base do núcleo	87
5.1.3	Influência da não linearidade geométrica	89
5.2	RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO	90

5.3	VALIDAÇÃO DO CÓDIGO	92
6	CONCLUSÕES	95
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICES	100

1 INTRODUÇÃO

A construção de edifícios altos tem sido um fenômeno global nas últimas décadas, como pode ser visto através do crescimento do número dessas unidades, principalmente, no continente asiático (ALI; MOON, 2018). A escassez de terras nos grandes centros urbanos, aliado ao ritmo crescente de urbanização neste período, são fatores que contribuíram para esse fato. Deste modo, soluções verticais são consideradas as principais e mais reconhecidas opções para acomodar a alta densidade populacional, com menor impacto ao meio ambiente (ELBAKHEIT, 2012).

No entanto, os arranha-céus são um desafio de engenharia, principalmente em relação ao projeto estrutural, por possuírem grande sensibilidade às ações naturais como, por exemplo, os carregamentos laterais de vento e sismo. A intensidade destas ações, no ponto de vista do projeto estrutural, está diretamente ligada à altura da estrutura, ou seja, à medida que os edifícios crescem em direção ao céu, o controle do comportamento estrutural torna-se cada vez mais desafiador. Deste modo, os critérios de estabilidade e rigidez tornam-se mais relevantes do que o critério de resistência e, portanto, passam a controlar o projeto final. Sendo assim, escolher o melhor sistema estrutural é um fator determinante para redução da quantidade de materiais, assim como para satisfazer condições de segurança relativas aos critérios normativos ou ainda para adequar-se à estética arquitetônica.

Sistemas estruturais convencionais – como é o caso dos aperticados, compostos por núcleos rígidos ou combinação de ambos – passam a não serem mais uma solução econômica para mitigar as cargas laterais à medida que o número de pavimentos aumenta. Dentre as diversas possíveis soluções, o sistema *outrigger* é uma das opções mais empregadas nas últimas décadas, por apresentar aspectos compatíveis com edifícios altos contemporâneos. Um dos mais importantes é associado à questão arquitetônica devido a flexibilidade das fachadas. Além disso, por serem implementados em determinados pavimentos, já são oportunos para serem combinados com outros projetos (pavimentos mecânicos).

O sistema *outrigger* é composto pelo sistema interno (núcleo rígido) e externo (colunas perimetrais), unidos através de um elemento rígido, conhecido como *outrigger* (OR). Eventualmente, são adicionados cinturões em torno do perímetro para efetuar a conexão entre os pilares externos, conhecidos na literatura como *belt-truss* (BT).

No Brasil, o primeiro e também o maior edifício residencial, atualmente em construção, a empregar o sistema *outrigger* é o Yachthouse Residence Club com 281 m de altura (81 pavimentos), ilustrado na Figura 1.1. Ao longo da altura foram construídos dois ORs, os quais foram

posicionados nos pavimentos 30 e 53.



Figura 1.1 – Yachthouse Residence Club sob construção (fonte: Wikipédia (2021))

A ocorrência de um pavimento ótimo pode ser explicada através da combinação de dois fatores: (a) a rigidez lateral proporcionada pelo OR; e (b) rotação do núcleo sob cargas laterais. A primeira é inversamente proporcional à altura de sua posição até a base, ou seja, quanto mais próximo da base, maior será a rigidez. Por outro lado, a variação de rotação do núcleo é parabólica, sendo máxima no topo. Portanto, existe um pavimento entre o topo e a base na qual a redução de certo objetivo é máxima (TARANATH, 2009).

Os ORs, a princípio, podem ser introduzidos em qualquer pavimento ao longo da altura do edifício. Entretanto, existem pavimentos específicos no qual sua influência é maior para assegurar o controle de certos objetivos. O máximo deslocamento lateral (MDL), assim como o momento na base do núcleo (MBN), são objetivos importantes a serem reduzidos para se obter um projeto otimizado. Sendo assim, conhecer os pavimentos ótimos é de extrema relevância para os projetistas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo principal

Neste trabalho se investiga uma metodologia para a determinação dos pavimentos ótimos ao implementar ORs/ORs-BTs ao longo da altura de um edifício alto para reduzir tanto o máximo deslocamento lateral da estrutura, quanto o momento na base do núcleo, de forma separada e conjunta. Além disso, analisa-se a influência destes elementos sobre outros critérios como, por exemplo, a máxima aceleração e as frequências naturais.

1.1.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários deste trabalho podem ser sumarizados em:

- a) estudo sobre a modelagem de edifícios altos;
- b) criar um modelo parametrizado em elementos finitos de um edifício alto com o *software* ANSYS levando em consideração a ação do vento;
- c) implementar um algoritmo de otimização mono-objetivo não baseado em gradientes e para variáveis inteiras, e sua validação através de funções *benchmark*;
- d) acoplar o algoritmo de otimização desenvolvido com o ANSYS;
- e) implementar um algoritmo de otimização multiobjetivo de modo a obter o conjunto de soluções que integram a fronteira de Pareto¹;
- f) avaliar a influência da rigidez dos elementos que compõem o sistema OR nas posições ótimas;
- g) verificar o resultado de outros critérios ao implementar ORs/ORs-BTs;
- h) Obter os pavimentos ótimos e suas correspondentes reduções através da otimização mono-objetivo, tendo como função objetivo o máximo deslocamento lateral;
- i) Obter os pavimentos ótimos e suas correspondentes reduções através da otimização mono-objetivo, tendo como função objetivo o momento fletor na base do núcleo;
- j) Realizar uma otimização multiobjetivo de forma a obter o conjunto de soluções que integram a fronteira de Pareto, tendo como funções objetivo o máximo deslocamento lateral e o momento fletor na base do núcleo;

¹ Conjunto de soluções igualmente viáveis não dominadas entre si, que satisfazem o espaço do critério viável.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 1 é apresentada de maneira inicial o tema do trabalho, o qual contempla a problemática, justificativa e objetivos.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica relativa a edifícios altos. Sistemas de contraventamento com ênfase no sistema *outrigger*, carregamento lateral de vento, critérios de projeto, modelagem e análise estrutural de edifícios altos são assuntos discutidos ao longo deste capítulo.

No Capítulo 3 são apresentados todos os conceitos fundamentais para a realização do trabalho. Em primeiro momento, o *software* ANSYS e os respectivos elementos utilizados na modelagem do edifício alto através do método dos elementos finitos são descritos. Logo em seguida, expõe-se o método de cálculo da ação do vento conforme a NBR6123/88 aplicado ao edifício. Por fim, são apresentados a formulação do problema e os algoritmos utilizados na otimização mono e multiobjetivo.

No Capítulo 4 é apresentada a modelagem do edifício alto no ANSYS empregado nas análises. De modo a validar o modelo é verificado a sua resposta através de um estudo de malha de elementos finitos e, posteriormente, com o edifício ainda sem ORs/BTs, realiza-se duas análises: modal e estática. Ao adicionar o OR/BT observa-se o comportamento do edifício ao variar a rigidez do OR e BT, relação de rigidez entre as colunas externas e o núcleo rígido, e a influência destas modificações na posição ótima do OR/OR-BT.

No Capítulo 5 são indicadas as posições ótimas dos ORs/ORs-BTs resultantes das otimizações mono e multiobjetivo para o máximo deslocamento lateral e momento na base do núcleo. Além disso, através de buscas exaustivas valida-se o algoritmo utilizado no trabalho.

No Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais do trabalho e, também, sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta um breve histórico e faz uma introdução sobre edifícios altos tendo como ênfase o sistema estrutural *outrigger*.

2.1 EDIFÍCIOS ALTOS

Definir se um edifício possui as características necessárias para ser considerado alto não é uma tarefa fácil, em razão de não existir uma definição absoluta para o que de fato é um edifício alto. A estatura externa de uma estrutura é uma questão relativa. Eventualmente, em uma cidade pequena contendo apenas edificações com um andar, um edifício de cinco pavimentos aparentemente é alto. Já em uma cidade grande com diversos edifícios de 50 andares, um edifício de 5 pavimentos é considerado baixo (TARANATH, 2009). Por outro lado, o *Council on Tall Buildings and Urban Habitat* (CTBUH, 2021) comenta que algumas tecnologias implementadas num edifício como, por exemplo, elevadores específicos para o fluxo vertical ou sistemas estruturais para resistir carregamentos laterais, podem torná-lo alto.

Os edifícios altos recebem uma nomenclatura diferente à medida que sua altura aumenta. Tendo isso em vista, o CTBUH (2021) os subclassifica em dois grupos: super altos, quando a altura é igual ou superior a 300 m e, mega altos, quando a altura é igual ou excede os 600 m. Adicionalmente, define-se que um edifício alto possui função única sempre que 85% de sua ocupação for dedicada para uma função específica e, de uso misto, quando o espaço ao longo da altura é dividido em diferentes funções. Além disso, se 50% da altura da estrutura não for ocupável, ela é classificada como uma torre.

Segundo Ali e Moon (2018), a construção de edifícios altos têm sido um fenômeno global nas últimas décadas, como pode ser visto através do crescimento em relação ao número, principalmente, no continente asiático. Elbakheit (2012) cita que um dos fatores que contribuiu para isso é a escassez de terras em grandes centros aliado ao crescente ritmo de urbanização nesse período.

Diante dos avanços no campo da engenharia, construção e tecnologias digitais, houveram diversas inovações que contribuíram para o desenvolvimento de projetos arquitetônicos e sistemas estruturais em edifícios altos. Um dos pontos diretamente impactados a partir da segunda metade do século XX, foi a escolha do material dos principais elementos estruturais. Isto é, edifícios altos construídos completamente em aço, o que antes era quase inevitável por muitos motivos,

como a rápida execução, tornou-se a minoria dos casos e passaram a utilizar outros materiais. A Figura 2.1 ilustra exatamente esse fato, sendo uma tendência a construção de arranha-céus levando em conta os aspectos positivos de cada material (ALI; MOON, 2018).

O concreto como material estrutural em edifícios altos ganhou maior reconhecimento a partir dos anos 70 com crescimento gradual deste então, chegando a superar o aço em 2010. No entanto, cabe destacar o ganho de popularidade a respeito dos sistemas estruturais compósitos, sendo atualmente preferível frente aos demais. Ambas considerações podem ser visualizadas na Figura 2.1. Para Ali e Moon (2018) os edifícios altos em concreto tornaram-se visíveis devido a disponibilidade de concretos de alto desempenho e alta resistência, junto com a redução de tempo do ciclo de execução dos pisos. Já os compósitos, pela combinação dos aspectos positivos de cada material, o aço por ser mais resistente e dúctil do que o concreto, e o concreto por ser resistente ao fogo e acrescentar amortecimento para a estrutura. Adicionalmente, o processo de montagem pode ser coordenado para resultar em um ciclo rápido de montagem dos pisos.

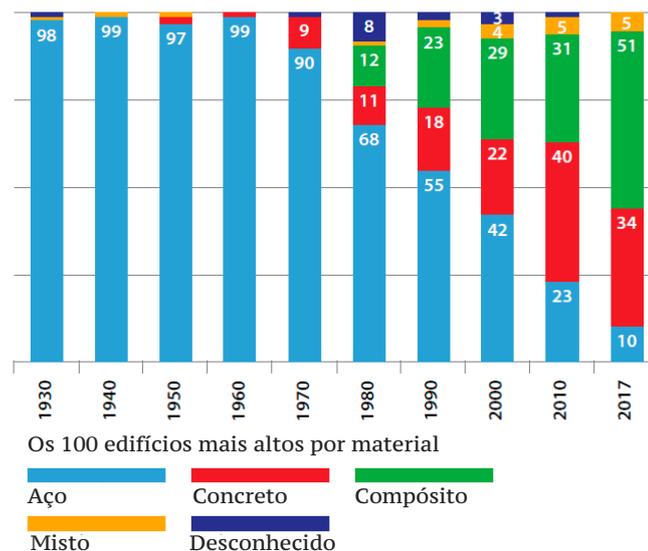


Figura 2.1 – Os 100 edifícios mais altos por material (fonte: CTBUH (2021) modificado)

A demanda por estruturas cada vez mais altas, também levou aos engenheiros a elaborarem novos sistemas estruturais para solucionar os desafios associados com a intensidade das cargas gravitacionais e laterais de maneira eficiente, os quais podem ser vistos na seção 2.2 de acordo com sua altura. Conforme Ali e Moon (2018) essas inovações alteraram a forma e organização dos edifícios altos e foram facilitadas pelas novas tendências arquitetônicas, demandas econômicas e desenvolvimento tecnológico de computadores digitais de alta velocidade, possibilitando análises estruturais mais racionais. O que antes era dominado por arranjos encaixotados formados por pórticos rígidos convencionais, converteu-se em formatos dos mais diferentes tipos.

Entretanto, à medida que qualquer tipo de elemento estrutural é ampliado em relação ao seu

comprimento, o efeito da carga tende a superar a sua resistência. Portanto, sabe-se que a escolha do tipo de elemento – viga, treliça, cabo – para obter um projeto otimizado, depende do vão que se deseja superar. O mesmo raciocínio pode ser aplicado às estruturas verticais, isto é, conforme a altura aumenta, diferentes esquemas estruturais são necessários (ALI; MOON, 2018). Isso ocorre devido aos carregamentos laterais, como sismos e ventos, serem intensificados (prêmio pela altura). Deste modo, os critérios de estabilidade e rigidez tornam-se mais relevantes do que o critério de resistência e, portanto, controlam o projeto final (SMITH; COULL, 1991).

A Figura 2.2 ilustra o consumo médio de aço num edifício de acordo com sua altura. A linha reta descreve a situação onde existem apenas cargas gravitacionais e, por outro lado, a linha tracejada quando são consideradas as ações laterais. É possível destacar que a partir de 10 andares as cargas laterais começam a ser perceptíveis, e ao atingir 50-60 andares, a controlar o projeto. Para Taranath (2009) essa altura é por volta de 50 andares. Segundo Ali e Moon (2018), uma forma de reduzir a área hachurada da Figura 2.2 é escolhendo o mais apropriado sistema estrutural, de modo a melhorar a distribuição das forças internas e deformações geradas nos elementos estruturais causadas pelas cargas externas.

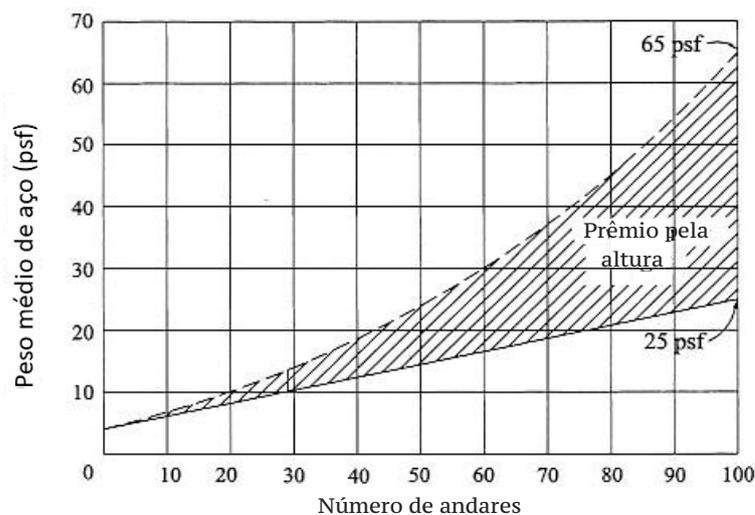


Figura 2.2 – Prêmio pela altura (fonte: Ali (2001) modificado)

2.1.1 Carregamentos laterais

Conforme já mencionado, os carregamentos laterais começam a ser dominantes, do ponto de vista do projeto estrutural, à medida que a altura da estrutura ultrapassa certo limite de pavimentos. Conforme Gunel e Ilgin (2014), edifícios altos demonstram sensibilidade sob vento e sismo por causa de sua elevada estatura e também por possuírem, em alguns casos, um coeficiente de esbelteza alto. Estas ações, por serem provenientes da natureza e variáveis no tempo, são difíceis de serem estimadas com precisão, diferente das cargas verticais que são definidas através dos elementos que compõem a edificação.

Além da altura do edifício, a massa possui uma função muito importante quando se trata do carregamento sísmico, de modo que ao aumentar a massa esses carregamentos são intensificados. A mesma lógica acontece sob o vento, no entanto neste caso o acréscimo de altura é mais relevante. Destaca-se que em edifícios altos o carregamento de vento é predominante em relação ao sismo, podendo causar movimentos oscilatórios notáveis no topo das estruturas. Sendo assim, limitar os deslocamentos no topo é uma medida capaz de minimizar o comportamento dinâmico, reduzindo o desconforto dos ocupantes do edifício (GUNEL; ILGIN, 2014).

2.1.1.1 Vento

Gunel e Ilgin (2014) comentam que nos primeiros arranha-céus diante da magnitude dos carregamentos gravitacionais devido aos materiais de construção utilizados, as cargas laterais de vento não possuíam muita importância. Entretanto, com desenvolvimento tecnológico dos materiais a relação entre resistência e peso se tornou maior, aliado aos novos sistemas estruturais empregados em edifícios altos, as ações de vento tornaram-se relevantes. Outro fator determinante para que os efeitos dinâmicos tenham se tornado críticos, conforme Fu (2018), é a tendência pela redução do peso dos pavimentos, com o intuito de obter fundações mais econômicas.

O vento pode ser decomposto pela soma de duas componentes: média (estática) e flutuante (dinâmica). A parcela correspondente a velocidade média aumenta à medida que se afasta do solo e, por outro lado, as flutuações em torno desta média, tendem a diminuir com a altura. Estruturas com dimensões menores, em geral, somente são consideradas a parcela estática. No entanto, edifícios altos por possuírem sensibilidade ao vento, efeitos dinâmicos não podem ser descartados, principalmente quando as frequências naturais são coincidentes ou próximas com a da ação do vento.

O escoamento de ar ao atingir a face de um edifício é capaz de assumir diversas configurações, a qual depende de diversos aspectos, como as condições de vizinhança, seção geométrica e rugosidade superficial. Em um cenário simples, este separa-se em duas direções e contorna a geometria do edifício, gerando respostas nas direções longitudinal e transversal, como pode ser visto na Figura 2.3. Além destas duas, ainda pode acontecer uma resposta torsional. Para Gunel e Ilgin (2014), o comportamento da estrutura vai depender das características do vento, suas dimensões, rigidez e distribuição de massa, condição de amortecimento e tipo de material, condições de contorno (vizinhança) e direção principal do vento em sua localidade.

Estudos sobre a ação do vento devem considerar situações indesejadas que possam ocorrer pela interferência do fluxo no local da implementação da nova construção. O impacto aos pedestres é um deles e deve ser investigado (MENDIS et al., 2007). Além disso, é inevitável que sejam realizadas estimativas para verificar as pressões atuantes no sistema de revestimento e contraventamento, para que estes possuam uma resposta adequada frente aos carregamentos

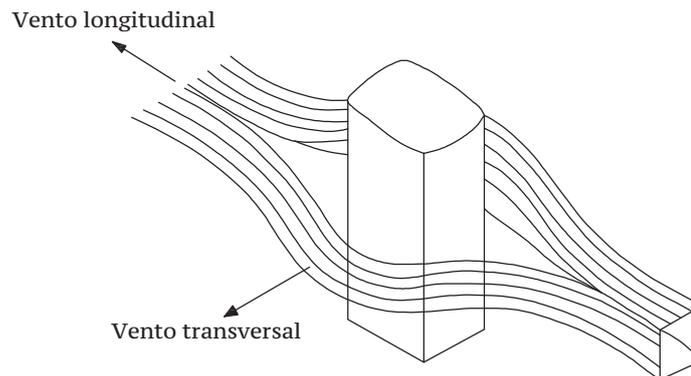


Figura 2.3 – Vento nas direções longitudinal e transversal (fonte: Fu (2018) modificado)

laterais.

2.1.1.1.1 Vento longitudinal

A maioria das normas técnicas fornecem perfis de velocidade média para a direção longitudinal do vento variando ao longo da altura de acordo com tipo de terreno. Para ventos bem comportados provenientes de eventos meteorológicos como o de ciclones extratropicais, o principal fator que influencia o modo pelo qual será o comportamento deste perfil é a rugosidade superficial do solo (BLESSMANN, 2013). A Figura 2.4 ilustra os diferentes tipos de perfis de velocidade média, conforme o comprimento de rugosidade, z_o . No interior da camada limite atmosférica, a velocidade varia de zero até a velocidade gradiente, na altura gradiente. Em terrenos abertos sem a presença de muitos obstáculos, a turbulência é menor e, portanto, a altura gradiente é mais baixa. Por outro lado, terrenos com muitas rugosidades, como é o caso de centro de cidades grandes, a turbulência e a altura gradiente são mais altas.

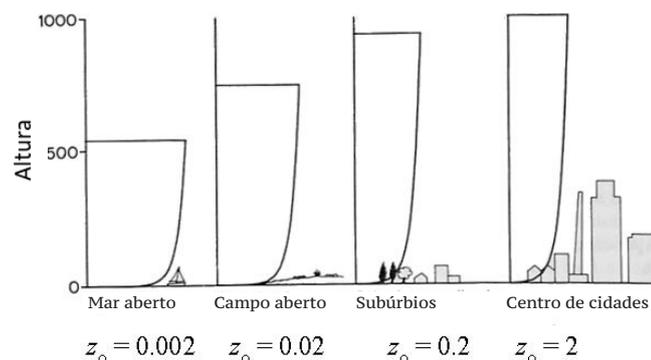


Figura 2.4 – Perfis de velocidade média para diferentes terrenos (fonte: Mendis et al. (2007) modificado)

Os turbilhões de ventos, ou também flutuações, tem um papel fundamental no comportamento estrutural, tanto na determinação das pressões devidas ao vento, quanto na resposta dinâmica da

estrutura. Estes geram as rajadas de vento, às quais ocorrem em ordem aleatória de frequências e intensidades, sendo que sua intensidade é inversamente proporcional ao tamanho/duração (BLESSMANN, 2013).

O intervalo de tempo e as dimensões das rajadas de vento estão diretamente ligados à resposta de uma estrutura. Quando as flutuações conseguem envolver totalmente um edifício e, ainda, possuem tempo de atuação considerável, é possível que haja respostas (deslocamentos e acelerações) amplificadas, desde que a frequência da energia da excitação seja próxima da frequência natural da edificação (BLESSMANN, 2013).

2.1.1.1.2 Vento transversal

Diferente da resposta do vento na direção longitudinal, o vento transversal possui mais sensibilidade com a velocidade de vento. Sob baixas velocidades o desprendimento ocorre ao mesmo instante em ambos os lados da edificação. No entanto, em velocidades mais altas, os vórtices são desprendidos de forma alternada, ocasionando forças de flutuações de alta intensidade nas faces laterais opostas (IRWIN et al., 2008). Esse fenômeno é conhecido como vórtices de von Kármán, o qual é ilustrado na Figura 2.5.

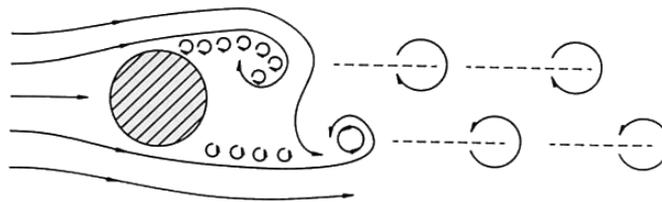


Figura 2.5 – Formação de vórtices de von Kármán (fonte: Mendis et al. (2007))

Em geral, o formato em planta do edifício interfere diretamente na formação dos vórtices. Retângulos, círculos ou corpos similares estão mais sujeitos a tal evento. O desprendimento de vórtices possui uma periodicidade dominante – definida pelo número de Strouhal, dimensão característica e velocidade crítica de vento. Caso a frequência natural da estrutura ocorra na mesma frequência dos desprendimentos, a resposta em deslocamentos é amplificada. Através de alguns parâmetros relacionados à estrutura é possível conhecer a velocidade crítica de vento, V_{cr} , para que tal evento ocorra, dada por

$$V_{cr} = \frac{fL}{St} \quad (2.1)$$

em que f é a frequência natural da estrutura, L é a dimensão característica e St é o número de Strouhal.

O movimento oscilatório perpendicular à ação do vento provoca as maiores acelerações em edifícios esbeltos ou super altos, devido principalmente as baixas frequências naturais, mesmo

em baixos intervalos médios de recorrência (BISWAS; PERONTO, 2020). Consequentemente, diante dos limites de serviço para evitar o desconforto humano, esse fenômeno comumente controla o projeto do sistema estrutural de resistência lateral. Irwin et al. (2008) destaca que a presença deste comportamento divide os edifícios em médios ou altos.

2.1.1.1.3 Túnel de vento

Os tuneis de vento, na engenharia estrutural, têm por objetivo reproduzir a camada limite atmosférica (CLA) em uma escala reduzida, tornando-se possível estimar as cargas laterais e suas respostas de maneira mais realística em edificações sob eventos meteorológicos comportados. Essa técnica é importante para compreender o comportamento de estruturas complexas, pelas quais não existem diretrizes normativas. Casos em que a geometria não é usual, que a interação fluido-estrutura interfira no resultado final, ou ainda que a influência da condição do terreno ao seu redor seja relevante, podem ser citados como exemplos para serem empregados em tuneis de vento (MENDIS et al., 2007).

Fu (2018) sugere que edifícios com mais de 200 metros de altura sejam projetados a partir dos dados obtidos de um túnel de vento, pois para estes casos a resposta dinâmica tende a ser dominante. Conduzir testes desde a fase inicial pode ser determinante para atingir um projeto otimizado, tendo em vista que qualquer pequena modificação arquitetônica é capaz de alterar consideravelmente a distribuição do escoamento de vento e, portanto, a sua resposta (BISWAS; PERONTO, 2020).

Além disso, de acordo com Irwin et al. (2008), desenvolver um projeto com formatos aerodinâmicos juntamente com este tipo de ferramenta é uma das maneiras mais eficazes de reduzir os carregamentos gerados pelo vento. Consequentemente, as dimensões dos elementos estruturais que compõem o sistema de contraventamento são diretamente afetadas, o que permite reduzir os custos da construção.

Dentre os modelos existentes para avaliar o comportamento de edifícios altos em tuneis de vento, destacam-se:

- a) Modelo rígido: pode-se medir os esforços de momento e cisalhamento na base do modelo diretamente através de uma balança, sendo conhecido como o método *high-frequency balance* (HFB). Ou ainda integrando as pressões desenvolvidas ao longo do modelo, conhecido como *high-frequency pressure integration* (HFPI).
- b) Modelo elástico: ao reproduzir as propriedades da estrutura – rigidez, massa, amortecimento – em escala reduzida de forma fiel, o método aeroelástico possui a capaci-

dade de captar as forças aerodinâmicas devido aos deslocamentos provocados pelo vento.

O método HFB pode ser empregado, em estágios iniciais, para definir o sistema lateral mais adequado e também para avaliar as respostas em função da geometria do edifício. Ambos os métodos utilizados no modelo rígido podem ser adotados para obter o carregamento de vento. Já no modelo aeroelástico, por exigir um custo e tempo mais elevado, somente são utilizados em estágios finais, se existirem indícios que o amortecimento aerodinâmico deva ser considerado para verificar o comportamento do edifício alto (BISWAS; PERONTO, 2020).

Sendo assim, o túnel de vento é uma ferramenta fundamental para avaliar de maneira precisa o comportamento estático e dinâmico de edificações, tendo em vista todas as aproximações indicadas pelas normas em geral como, por exemplo, nos coeficientes de arrasto e sustentação.

2.1.2 Considerações de projeto

2.1.2.1 Critérios de projeto

De modo geral, os edifícios altos quando submetidos a ações laterais devem respeitar aos critérios de: (a) resistência e estabilidade, que sob o estado limite último deve garantir o desempenho adequado dos elementos estruturais que pertencem ao sistema de contraventamento durante sua vida útil; (b) serviço, com o intuito de controlar os movimentos laterais, ou seja, deslocamentos e acelerações. O intervalo médio de recorrência referente a cada um dos objetivos mencionados é diferente. Para o critério de resistência, por exemplo, a ASCE7-16 (2017) indica um intervalo médio de recorrência de acordo com a categoria de risco da edificação, variando de 300 a 3000 anos. Já para o critério de serviço, o mesmo código não define um valor específico, deixando a cargo do engenheiro escolher o mais apropriado. No entanto, existem sugestões para que os projetistas empreguem um intervalo médio de recorrência de 10 a 100 anos em relação aos máximos deslocamentos estáticos, devido aos mapas das isopletras fornecidos. No caso das acelerações ou percepções de movimento, segundo Biswas e Peronto (2020), tradicionalmente na América do Norte são empregados intervalos de 10 anos.

Os efeitos de segunda ordem sempre estão presentes em edificações quando submetidas a cargas laterais de vento ou sismo, e estão relacionados a estabilidade da estrutura. Em alguns casos não introduzem grandes esforços adicionais, já em outros, como é o caso dos edifícios altos, podem ser determinantes para um projeto de boa qualidade. Estes efeitos estão diretamente ligados a rigidez lateral e a intensidade das cargas gravitacionais. Na Figura 2.6 é ilustrado o efeito da não linearidade geométrica, a qual pode ser captada através da análise P-Delta. Conforme Biswas e Peronto (2020), uma das maneiras de verificar a margem de segurança de edifícios sob os efeitos

de segunda ordem é aplicar a equação do coeficiente de estabilidade, dada por

$$Q = 1 - \frac{\Delta_1}{\Delta} \quad (2.2)$$

em que Δ_1 é o deslocamento de primeira ordem e Δ é o deslocamento total ($\Delta_1 + \Delta_2$).

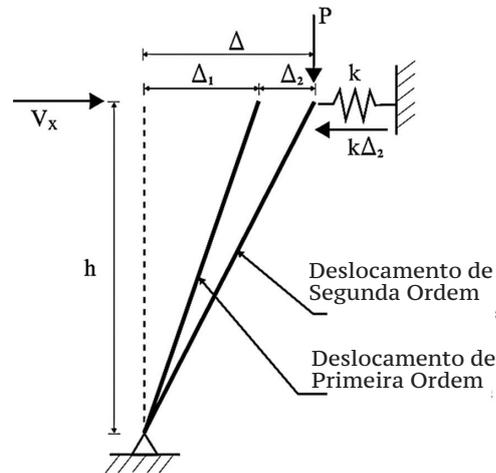


Figura 2.6 – Efeito de segunda ordem (fonte: Biswas e Peronto (2020) modificado)

Existem diversas maneiras de examinar os deslocamentos de edifícios, sob ações laterais, podendo-se destacar:

- Deslocamento global: É o maior deslocamento horizontal ao longo do edifício, o qual é utilizado para verificar de modo rápido o comportamento global da estrutura. Segundo Taranath (2016), o limite deste deslocamento em relação ao projeto de vento é de $H/400$ a $H/500$, sendo H a altura do edifício.
- Razão de deslocamento entre pavimentos: É definido como sendo o deslocamento horizontal relativo entre dois pavimentos adjacentes, o qual pode ser calculado através de seguinte expressão:

$$\Delta_{pav} = \frac{\delta_n - \delta_{n-1}}{h} \quad (2.3)$$

em que δ_n e δ_{n-1} são os deslocamentos horizontais nos pavimentos n e $n - 1$, respectivamente, e h é a distância vertical entre os pavimentos.

- Drift Measurement Index* (DMI): Combina os movimentos relativos horizontais e verticais de um ambiente ou área de interesse, com o intuito de isolar a deformação por cisalhamento. É um importante fator para avaliar corretamente as deformações em elementos não estruturais, como é o caso dos revestimentos ou divisórias

(BISWAS; PERONTO, 2020). Considerando um ambiente com 4 cantos, o DMI pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$DMI = 0,5(D_1 + D_2 + D_3 + D_4) \quad (2.4)$$

em que $D_1 = (X_A - X_C)/h$ e $D_2 = (X_B - X_D)/h$ são as componentes horizontais da deformação, $D_3 = (Y_D - Y_C)/L$ e $D_4 = (Y_B - Y_A)/L$ são as componentes verticais da deformação, h e L são as distâncias vertical e horizontal de um ambiente, respectivamente, e os pontos (A, B, C e D) estão localizados em ordem alfabética no sentido horário, com A no canto superior esquerdo.

Controlar os movimentos laterais de um arranha-céu é uma medida importante durante o projeto. Usualmente estes parâmetros mencionados anteriormente devem ser limitados para minimizar os danos em elementos que não fazem parte do sistema estrutural, sendo que estes limites podem variar de acordo com o tipo de material, por exemplo. Entretanto, conforme Biswas e Peronto (2020) é possível adotar um DMI limite de 1/400 para um intervalo médio de recorrência de 10 anos e 1/300 para um intervalo médio de recorrência de 50 anos.

Dentre todos os critérios empregados na análise de edifícios altos, na maioria dos casos, o que envolve o conforto humano é o que controla a escolha do sistema estrutural/dimensões dos elementos estruturais (FU, 2018). A aceleração de pico nos pavimentos superiores é o parâmetro medido para verificar o conforto dos ocupantes. No caso de edifícios residenciais, o limite desta aceleração é mais restritivo do que para os comerciais. Segundo Taranath (2016), este limite é de 2 a 2,5% da aceleração da gravidade (g) para os comerciais e 1,5 a 2% de g para os residenciais, com um intervalo médio de recorrência de 10 anos. Vale ressaltar que por se tratar de uma análise dinâmica, o modelo da estrutura deve incluir corretamente a massa, rigidez e amortecimento, pois todos estes interferem no resultado final da aceleração. Além disso, em edifícios usuais geralmente somente as três primeiras frequências naturais da estrutura possuem influência preponderante na resposta dinâmica do vento. Estas frequências correspondem aos modos de vibração de flexão em torno das duas direções principais e torção em torno da altura.

2.1.2.2 Modelagem e análise estrutural

Estruturas complexas, como é o caso dos edifícios altos, devem ser analisadas de maneira rigorosa pelo fato de possuírem diversos aspectos que fogem do usual. Ações plásticas, encurtamento diferencial, gradientes térmicos, cargas de impacto e análise sequencial da construção são alguns destes aspectos que devem ser considerados no projeto para que se tenha um desempenho adequado durante toda a sua vida útil. Para Fu (2018) compreender o real comportamento destas estruturas empregando métodos e teorias atuais de análise estrutural é crucial para se obter um projeto eficiente.

Segundo Biswas e Peronto (2020), existem dois pontos importantes a serem considerados ao projetar edifícios altos: (a) estimar, com precisão, a sua rigidez e massa de modo a obter as propriedades dinâmicas e seus respectivos deslocamentos de maneira correta; e (b) avaliar e distribuir as cargas nos elementos que compõem o sistema de resistência lateral, com o intuito que estes sejam dimensionados com a resistência apropriada com relação ao estado limite último.

Um modelo complexo não necessariamente deve ser modelado de forma complexa, ou seja, levando em conta todos os detalhes que constituem a estrutura, quando submetido ao efeito de vento. Em geral, um modelo simples contendo somente os elementos que participam do contraventamento é o suficiente para alcançar os objetivos de projeto. No entanto, ao separar os elementos do sistema lateral daqueles que apenas cumprem a função de absorver as cargas gravitacionais, deve-se limitar ou ao menos levar em consideração as forças de vento que podem vir a ser absorvidas devido a questões de rigidez relativa e conectividade (BISWAS; PERONTO, 2020).

No caso de conceber um modelo completo sem as apropriadas considerações (liberação de rotação e/ou modificadores de rigidez), aqueles elementos com o papel de suportar as cargas gravitacionais irão absorver, de maneira indesejável, cargas laterais. Ao nível de resistência tais considerações são fundamentais para garantir que nenhuma parte da carga lateral seja negligenciada, mas redistribuídas para os elementos pretendidos, o que pode ser justificado pela ductilidade do aço e fissuração do concreto. Contudo, se um componente esteja submetido a deformações excessivas, este deve ser incluído no sistema lateral e, portanto, dimensionado para esse fim. Por outro lado, ao nível de serviço tais considerações devem ser evitadas, para que se obtenha uma rigidez mais realística de toda a estrutura (BISWAS; PERONTO, 2020).

Embora os elementos não estruturais, revestimentos e divisórias, possam beneficiar o comportamento dinâmico final do edifício, pela adição de rigidez, esses efeitos não podem ser previstos de forma confiável na fase de projeto, e não é apropriado incluir qualquer contribuição de rigidez de elementos que não foram projetados e detalhados para suportar tal carregamento. Caso estes elementos estejam sujeitos a cargas laterais, é quase inevitável que sejam danificados.

O efeito diafragma em edifícios altos, usualmente, é promovido pela rigidez axial dos pavimentos. Estes pisos não necessariamente precisam ser modelados por completo para se obter uma distribuição com precisão da carga lateral, mas, como alternativa, assumidos através de simplificações. Na maioria dos casos considerar que os pavimentos acima da base do edifício funcionam como um diafragma rígido é uma simplificação válida e que possibilita distribuir a carga para os elementos do sistema lateral de acordo com a sua rigidez. No nível do *outrigger* e *belt-truss* ou próximo a este, principalmente quando estão acoplados à laje, para evitar rigidez adicional e caminhos de cargas equivocados, o diafragma semirrígido é a opção que deve ser empregada (CHOI et al., 2017).

Sistemas laterais de concreto armado quando submetidos ao carregamento de vento tendem a perder parte de sua rigidez lateral devido à alta sensibilidade a fissuração. Este efeito, presente em estruturas que empregam o material concreto, pode ser considerado de duas maneiras no modelo estrutural: (a) modelá-lo possuindo um comportamento não linear; ou (b) aplicando coeficientes redutores da rigidez. Dentre estas opções, a segunda permite que a análise continue sendo elástica, situação comum quando se trata de projeto para o vento (BISWAS; PERONTO, 2020).

2.2 SISTEMAS DE CONTRAVENTAMENTO

Com o avanço tecnológico, os engenheiros durante as últimas cinco décadas desenvolveram diversos sistemas estruturais com objetivo aprimorar a resistência lateral de edifícios altos. A escolha do tipo de sistema é um fator determinante para redução da quantidade de materiais, assim como para satisfazer critérios de segurança, serviço e estético (GUNEL; ILGIN, 2007). Deste modo, Ali e Moon (2018) propõem uma classificação para os sistemas estruturais internos baseado na altura, Figura 2.7. Essa classificação incorpora todos os tipos de estruturas – aço, concreto e compósito –, e tem o propósito de demonstrar a altura limite eficiente de cada um. A relação de esbeltez do edifício pode ser de até 10, mas não limitada a este valor.

Os sistemas estruturais internos podem ser divididos em:

- a) *Rigid frames*: é um arranjo estrutural composto somente de pilares e vigas conectados de forma rígida, formando um pórtico espacial. A resistência do sistema é proveniente da rigidez à flexão de seus elementos. Em relação ao material empregado, a altura limite eficiente é de 20 pavimentos, para o concreto, e 30 para o aço (ALI; MOON, 2007);
- b) *Braced hinged frames*: é um sistema em aço dividido em duas partes – a central, formada por um núcleo vertical treliçado; e a externa, formada por vigas e colunas articuladas entre si. A resistência lateral é proveniente da rigidez axial dos membros que compõem o núcleo treliçado que, quando submetido às ações laterais, se comporta como um elemento em balanço (ALI; MOON, 2007). A altura limite eficiente é de 20 pavimentos (ALI; MOON, 2018);
- c) *Shear Wall/Hinged steel frame*: é um esquema estrutural compósito que é constituído por pilares parede de concreto armado (núcleo) e pórticos de aço. A resistência lateral é, principalmente, dada pelas paredes do núcleo que são paralelas às ações laterais. Já a parte externa de aço é articulada e resiste somente as cargas gravitacionais

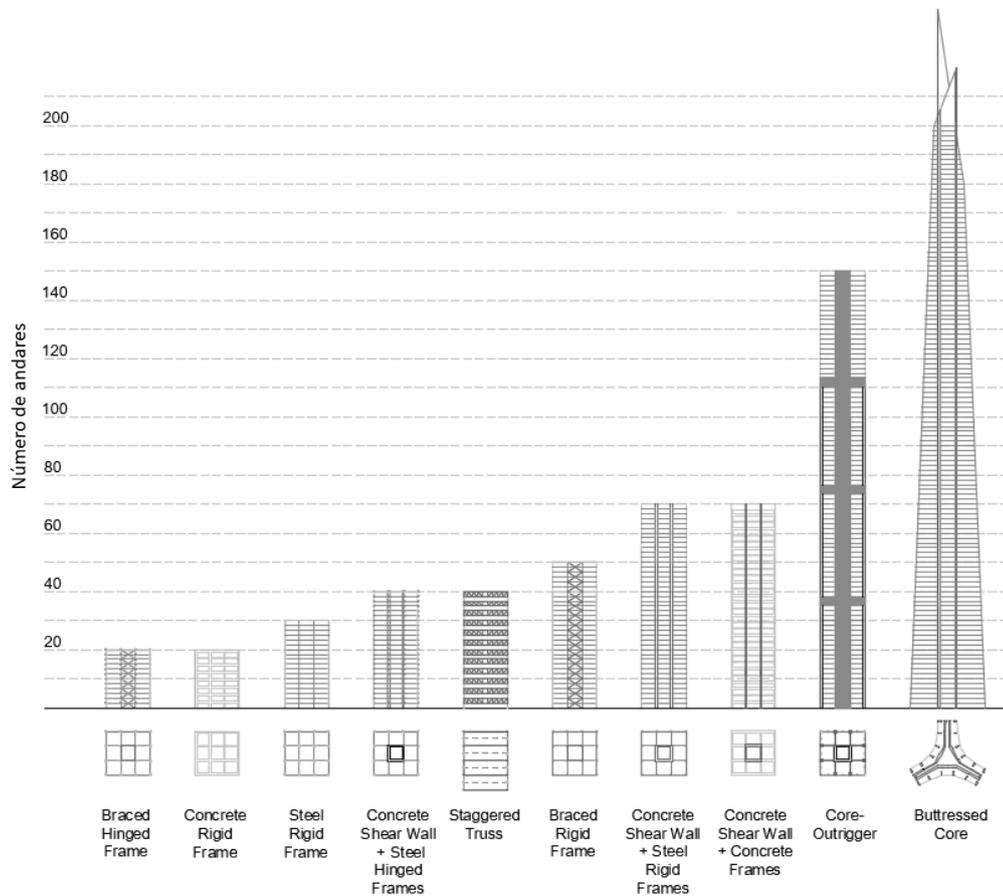


Figura 2.7 – Sistemas estruturais internos (fonte: Ali e Moon (2018) modificado)

(ALI; MOON, 2007). Segundo Ali e Moon (2018), a altura limite eficiente para esse sistema é de 40 pavimentos;

- d) *Staggered Truss*: foi considerado um sistema em aço muito eficiente para edifícios altos nos anos 60. É composto por treliças que ocupam toda a altura do pavimento e abrangem toda a largura entre duas fileiras de pilares. Em geral, possuem espaçamento regulares entre si, em relação a altura, e são mais apropriados em edifícios com plantas regulares. Esse sistema é considerado eficiente para uma altura de 40 andares (ALI; MOON, 2018);
- e) *Braced Rigid Frame*: é similar ao sistema do item b, no entanto, as ligações são consideradas rígidas. Assim, existe a interação entre todos os elementos que compõem a estrutura, o que cria um conjunto resistente às ações laterais (ALI; MOON, 2007). Portanto, conforme Ali e Moon (2018), esse esquema torna-se eficiente num edifício com cerca de 50 pavimentos.
- f) *Shear Wall/Rigid frame*: pode ser constituído de um arranjo completamente em concreto armado, núcleo e pórticos, ou então por uma mistura de elementos em

concreto e aço, isto é, núcleo em concreto e pórticos em aço. Nestes casos, todos os elementos resistem às cargas laterais e gravitacionais, pois as conexões são pensadas de forma rígida (ALI; MOON, 2007). Ambos são apontados como sendo eficientes com 70 pavimentos, conforme Ali e Moon (2018).

g) *Core-Outrigger*: esse sistema faz a união do núcleo rígido, parte interna, com as colunas da parte externa através do *outrigger* (elemento rígido horizontal). O núcleo, o *outrigger* e o *perimeter belt* (cinturão) podem ser de concreto, aço ou de ambos materiais. Já as colunas do perímetro, em geral, são de concreto. Este arranjo pode ser dividido em duas configurações:

- Primeira configuração: possui núcleo, *outrigger*, colunas perimetrais e o cinturão perimetral;
- Segunda configuração: possui núcleo, *outrigger*, mega colunas, podendo-se incluir ou não o cinturão perimetral;

A altura limite eficiente no primeiro caso é de 80 pavimentos e, para o segundo, 150 pavimentos (ALI; MOON, 2018);

h) *Buttressed Core*: o material utilizado neste tipo é o concreto armado. A forma do edifício é dada pelo sistema estrutural, que a partir de um núcleo central são estendidos 3 contrafortes, contendo, ainda, paredes perpendiculares em seu entorno. Além disso, podem ou não serem adicionados *outriggers*. O sistema possui uma notável rigidez lateral e torsional. A altura limite eficiente é por volta de 200 pavimentos (ALI; MOON, 2018);

A seleção dos arranjos estruturais mencionados acima é dependente do tipo de material empregado na construção, número de andares, tipo de carregamento e aspectos arquitetônicos. Vale ressaltar que o sistema *core-outrigger*, objeto de estudo nesta dissertação, embora esteja enquadrado como sendo um sistema interno, engloba as porções internas e externas, podendo ser considerado como híbrido. Na subseção 2.2.1 são apresentados mais detalhes sobre este tópico.

2.2.1 *Outriggers*

Desde sua concepção nos anos 80, o sistema *outrigger* vem se propagando cada vez mais em edifícios altos com plantas relativamente regulares dado seus resultados satisfatórios. Nesse tipo de estrutura, condições de serviço e segurança têm sido as principais questões por causa da relevância das ações laterais de ventos e sismos. Nesse aspecto o sistema é muito eficiente, pois sua implementação tem um único propósito: reduzir os deslocamentos laterais. Atualmente, tornou-se um arranjo estrutural empregado com frequência para controlar tais deslocamentos

em edifícios altos (CHEN; CAI; WANG, 2018; PARK et al., 2016). Na China, por exemplo, a maioria dos edifícios altos já empregam esse sistema estrutural (ZHOU; ZHANG; LU, 2017).

De acordo com Choi et al. (2017), a principal função do sistema *outrigger* é aumentar a rigidez lateral de modo a contribuir nos critérios de projeto, como o deslocamento entre pavimentos (*interstorey drift*) e deslocamento no topo (*top displacement*).

O sistema *outrigger* é capaz de assumir diversas configurações, dependendo das condições da estrutura, do tipo de carregamento dominante na estrutura, espaço disponível, entre outros. Essas configurações podem ser obtidas simplesmente pela diferente escolha dos tipos de elementos para o sistema interno, externo, ou do próprio *outrigger* (ALHADDAD et al., 2020). Sendo assim, os componentes que integram o sistema podem ser divididos em:

- a) Sistema estrutural interno: É formado por um núcleo rígido, que possui um comportamento similar a uma viga em balanço fixada na base. Geralmente é localizado mais ao centro do edifício (FU, 2018; GUNEL; ILGIN, 2014). Em relação ao tipo de material, pode ser:
 - Núcleo de aço (*steel braced core*): consiste num conjunto de pórticos rígidos com elementos em diagonal, os quais apresentam a forma de uma treliça vertical. A principal motivação para a sua utilização é pelo fato de ser uma solução leve, o que interfere diretamente no projeto de fundações. Entretanto, por não ser resistente ao fogo e, após os ataques de 11/09/01, atualmente são raramente utilizadas (FU, 2018);
 - Núcleo de concreto: trata-se de uma solução formada por pilares-paredes sólidos em concreto armado, podendo ou não conter aberturas. Diferente da solução em aço, fornece resistência ao fogo, sendo um refúgio de emergência. Além disso, é uma solução mais rígida e, em alguns países, possui custo menor (FU, 2018);
 - Núcleo compósito: eventualmente é formado por uma estrutura ou placas em aço coberta por concreto (GUNEL; ILGIN, 2014);
- b) Sistema estrutural externo: é composto por colunas perimetrais de aço, concreto, ou por ambos os materiais. Adicionalmente, em edifícios super altos são preferidas a utilização de mega colunas compósitas (tubo de aço preenchido com concreto) (ALHADDAD et al., 2020);
- c) *Outrigger*: é um elemento estrutural horizontal rígido que conecta o núcleo com as colunas perimetrais, para atuar mutuamente quando submetido às cargas laterais. Geralmente, são introduzidos através de um ou mais níveis ao longo da altura, de modo a enrijecer a estrutura (CHOI et al., 2017). Quanto ao tipo, podem ser de:

- Aço: é um elemento estrutural treliçado. Se comparado aos outros tipos é considerado o mais flexível, no entanto, é o mais empregado em edifícios altos (FU, 2018). A sua aplicação é vantajosa, pois possibilita uma pós conexão o que elimina parcialmente a transferência de forças gravitacionais por ações indesejadas como, por exemplo, o recalque diferencial e o encurtamento diferencial entre as colunas e o núcleo (CHOI et al., 2017);
 - Concreto: o elemento empregado é a viga parede. Deste modo, possui mais rigidez e menor custo, comparado ao OR de aço. Quando a principal ação lateral é o vento, a opção para utiliza-lo é bastante favorável (FU, 2018);
 - Híbrido: neste caso, são combinados os elementos treliçados com a viga parede em concreto, podendo ainda assumir uma forma mista, isto é, parte em concreto e outra parte em aço. Sendo assim, a performance da estrutura integra os benefícios de ambos, ou seja, a ductilidade do aço e a rigidez do concreto (FU, 2018);
 - Amortecido: trata-se de um tipo no qual são adicionados dispositivos de dissipação de energia entre o OR e as colunas externas. Desta forma, a resposta dinâmica (deslocamentos e acelerações) da estrutura sob ventos transversais (vórtices de von Kármán) e sismos é reduzida. Entretanto, pela conexão do amortecedor não ser rígida, como no caso dos ORs tradicionais, a rigidez global é de certa forma reduzida (FU, 2018; CHOI et al., 2017). Quanto ao tipo do amortecedor, pode ser: viscoso, viscoelástico, magnetoreológico ou de atrito;
- d) *Perimeter Belt*: é um elemento, em muitos casos, perpendicular ao OR, que cumpre a função de unir os pilares externos, de modo a transmitir os esforços axiais para todas as colunas do perímetro. Pode ser totalmente de concreto ou aço, ou uma mistura de ambos. Outro aspecto importante deste elemento é pela sua contribuição na rigidez torsional da estrutura, justamente por forçar as colunas do perímetro a atuarem de forma conjunta (CHOI et al., 2017);

O comportamento do sistema pode ser explicado de forma simples: quando a estrutura é submetida a ações laterais, o núcleo tenta inclinar-se e, por existirem braços rígidos (OR) conectados as colunas do perímetro, a rotação é transmitida para estas, induzindo esforços de compressão e tração. O resultado é o aumento da largura efetiva do edifício. Pode-se destacar as reduções dos momentos no núcleo, que por consequência aumentam as ações axiais nos pilares, conforme é ilustrado na Figura 2.9 (CHOI et al., 2017; TARANATH, 2009).

Todos os tipos de ORs citados anteriormente possuem uma conexão direta entre o núcleo e os pilares externos através de um membro rígido. Entretanto, também existe outra configuração em que a conexão é realizada de forma virtual, conhecida como *outrigger* virtual. Neste caso, devem estar presentes o núcleo, o *perimeter belt* e as lajes da parte superior e inferior ao pavimento

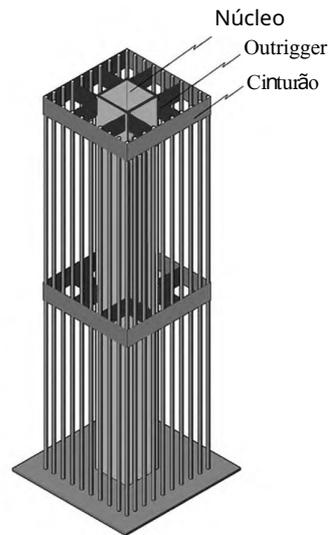


Figura 2.8 – Elementos do sistema OR (fonte: Gunel e Ilgin (2014) modificado)

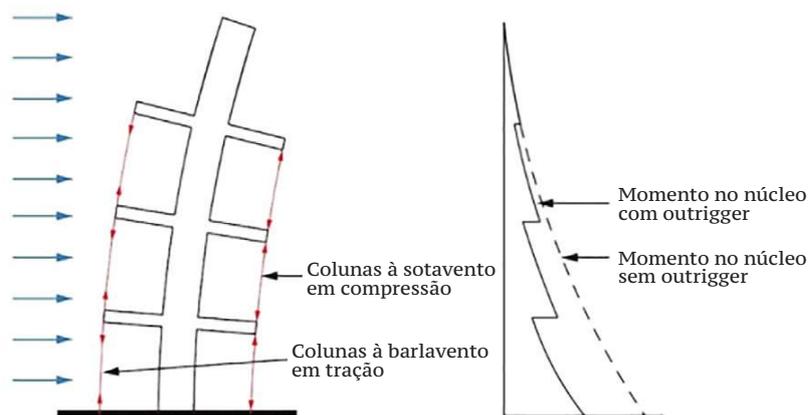


Figura 2.9 – Interação Núcleo-OR (fonte: Taranath (2009) modificado)

do sistema. Para o sistema cumprir seu objetivo as lajes devem ser rígidas o suficiente para serem capazes de transmitir a rotação do núcleo para as colunas do perímetro. Frente ao processo convencional, este tipo de conexão possui certas vantagens: a arquitetura interna ao pavimento não é comprometida pela presença do OR; e, ainda, evita transferência de cargas permanentes de peso próprio entre elementos verticais pelo encurtamento diferencial.

2.2.1.1 Considerações de projeto

Núcleos rígidos são concentrados junto aos elevadores, escadas ou *shafts*, sendo indispensáveis para os edifícios altos por serem uma zona de proteção ao fogo (FU, 2018). Geralmente são localizados dentro da planta do edifício a fim de minimizar a perda de espaço rentável. Do ponto de vista estrutural, devem ser alocados o mais próximo possível do centro do carregamento lateral de vento e centro de massa para a carga de sismo. Em muitos casos somente o núcleo já

é suficiente para limitar os deslocamentos laterais, entretanto a partir de certa altura somente aumentar a espessura para enrijecer a estrutura não é eficiente no ponto de vista econômico. Por este motivo, unir o sistema interno com o externo é uma opção, logo o sistema OR torna-se favorável para ser empregado. Entretanto, o mesmo elemento rígido que ajuda a resistir as cargas laterais também é sensível a qualquer deformação diferencial entre o núcleo e as colunas perimetrais, que eventualmente aconteçam (CHOI et al., 2017).

Efeitos diferenciais entre elementos verticais são fenômenos indesejáveis em edifícios altos e não podem ser negligenciados, devendo serem verificados na fase de projeto, pois podem comprometer o funcionamento da estrutura (KIM; LEE; LIM, 2019). O encurtamento diferencial axial entre elementos verticais devido ao elevado acúmulo de cargas gravitacionais ou por efeitos dependentes do tempo como a retração e fluência, levam à transferência de esforços entre colunas externas e o núcleo através do OR, ou então entre colunas, através do cinturão perimetral. Em geral, os pilares estão submetidos a tensões maiores do que o núcleo, portanto a redistribuição dos esforços é da parte externa para a interna, introduzindo novos carregamentos no OR. Caso sejam empregados diferentes materiais como, por exemplo, edifícios compósitos com núcleo em concreto e colunas em aço, o efeito diferencial pós-construção da deformação dependente do tempo pode atingir a casa dos centímetros (CHOI et al., 2017).

O recalque diferencial na fundação é outra fonte responsável pela diferença de altura entre membros verticais adjacentes. Na existência de um solo argiloso, o recalque tende a aumentar conforme o avanço do tempo, condição que deve ser verificada. Além disso, uma situação que pode ocorrer é o efeito favorável na redução do encurtamento entre as colunas e o núcleo, pois as deformações são maiores no centro do bloco do que na borda, obtendo-se uma solução conservadora diante de tantas incertezas (FANG et al., 2018).

A sequência de construção é capaz de interferir diretamente na transferência de carga por encurtamentos elásticos, tendo em vista que ao finalizar a construção da estrutura cerca de 95% da deformação já aconteceu (CHOI et al., 2017). Se o OR for fixado com certo atraso durante o período de construção como, por exemplo, até a implementação de um novo OR num pavimento acima, é possível reduzir o incremento de tensão devido ao encurtamento diferencial pela metade ou mais, dependendo principalmente do tempo percorrido até a fixação. Para determinar em qual etapa da construção deve-se realizar a conexão, de forma que nenhum critério normativo seja violado ou exista algum tipo de dano estrutural, é preciso avaliar por partes o processo construtivo. Ou seja, à medida que são acrescentados novos pavimentos reavalia-se a estabilidade ou limites definidos (FANG et al., 2018). Vale ressaltar que ao modificar a sequência de construção, estruturas em concreto ou compósitas ainda vão estar suscetíveis a deformações em função do tempo (CHOI et al., 2017; KIM; LEE; LIM, 2019).

2.2.1.2 Vantagens e desvantagens

Vantagens:

- a) Arquitetura da fachada mais flexível por não necessitar de um arranjo de pilares pouco espaçados, conciliável com a estética da estrutura (ALI; MOON, 2018; CHOI et al., 2017);
- b) Diversidade de escolha do material dos elementos que compõem o sistema *outrigger* (FU, 2018);
- c) Conexões simples entre o *outrigger* e as colunas localizadas no perímetro, sem a necessidade de conexões rígidas, gerando economia (ALHADDAD et al., 2020; LAME, 2008);
- d) Distribuição das cargas de tombamento ajuda a reduzir significativamente as resultantes de tração, força de elevação na fundação e a demanda de cisalhamento em *radiers* (CHOI et al., 2017; LAME, 2008);
- e) Contribui para a redução do encurtamento diferencial entre elementos verticais, embora aconteça o acréscimo de tensão no *outrigger*. Isso evita danos em elementos não estruturais e declive nos pavimentos (CHOI et al., 2017);
- f) Resulta em um caminho alternativo para a redistribuição de carregamentos devido à possível falha de elementos estruturais, evitando o colapso progressivo (KIM; PARK, 2012);

Desvantagens:

- a) Perda da utilização de espaço com valor comercial. No entanto, edifícios altos precisam de pavimentos mecânicos para alocar equipamentos elétricos e hidráulicos, bem como áreas de refúgio e, muitas vezes, tornam-se um local suscetível para a implementação do OR (CHOI et al., 2017);
- b) Impacto na rapidez do processo de construção, tendo em vista que a demanda por materiais é superior aos outros pavimentos (ALHADDAD et al., 2020; LAME, 2008);
- c) A implementação de pavimentos com *outrigger* induz a irregularidades na distribuição de rigidez ao longo da estrutura e, portanto, há um potencial formação de andares fracos sob cargas de sismos e ventos (ALHADDAD et al., 2020);

2.2.1.3 Fatores que influenciam o desempenho

A performance do sistema OR é ditada por diversos fatores. O pavimento no qual será implementado o OR possui influência tanto em relação aos deslocamentos laterais quanto ao momento de tombamento. O mesmo acontece para o número de ORs que será empregado, entretanto se essa quantidade for maior que cinco, o efeito passa a não ser tão significativo. Destaca-se que os dois objetivos citados são conflitantes, ou seja, a posição e a quantidade são diferentes em cada caso. Portanto, o arranjo mais eficiente é resultado exclusivo do objetivo de interesse. Vale ressaltar que a posição do OR para minimizar o momento na base do núcleo sempre é inferior ao do mínimo deslocamento (SMITH; COULL, 1991).

No caso em que as conexões são virtuais, a rigidez do diafragma possui uma grande influência em seu desempenho. Por outro lado, quando existem conexões diretas, a rigidez relativa entre os componentes do sistema, como a relação núcleo-colunas externas ou a relação núcleo-OR, também interfere no desempenho. Especificamente com respeito aos elementos, os fatores são: rigidez à flexão/cisalhamento do OR e BT; rigidez à flexão e, principalmente, axial das colunas externas; e rigidez à flexão do núcleo (ALHADDAD et al., 2020). Adicionalmente, a altura total do edifício, altura entre pavimentos, distância entre o núcleo e as colunas perimetrais e o tipo de carregamento são outros fatores que também interferem.

Escolher o sistema adequado também é um fator muito importante. Na Tabela 2.1 é possível verificar o tipo de OR ideal conforme alguns aspectos.

Tabela 2.1 – *Outrigger* mais adequado dado uma situação

Sistema com	É preferível quando
<i>Outrigger</i> rígido	a ação de vento é dominante
<i>Outrigger</i> flexível	a ação de sismo é dominante
<i>Outrigger</i> virtual	mais espaço livre é requerido ou quando é necessário evitar transferência de cargas de gravidade
<i>Outrigger</i> amortecido	ações de vento e sismo são dominantes

2.2.1.4 Trabalhos anteriores

Kim e Park (2012) conduziram um estudo verificando o potencial colapso progressivo de um edifício alto, analisado de forma estática e dinâmica não lineares. O comportamento foi verificado a partir de dois protótipos: o primeiro com um sistema composto por mega colunas, núcleo e OR; e o segundo com colunas comuns, núcleo, OR e BT. Em ambos os casos, o OR foi posicionado no topo do edifício. Ao retirar parte da coluna do primeiro pavimento, no caso da estrutura com a mega coluna, ocorreu um aumento acentuado do deslocamento até o colapso. Já para o caso do protótipo com OR e BT, a estrutura se manteve estável. Portanto, os autores observaram que o BT possui capacidade de redistribuir os esforços para o seu entorno, de modo que cada elemento ligado a ele absorva uma parcela, o que não ocorre quando existe somente o OR, pois todo o

esforço adicional fica condicionado ao mesmo.

Nanduri, Suresh e Hussain (2013) propuseram um modelo de um edifício tridimensional simétrico em concreto armado com 30 pavimentos (90 m de altura), com diferentes arranjos, considerando OR e BT, sujeito a cargas laterais de vento ou sismo. A ligação do OR com o núcleo e os pilares foi considerada, respectivamente, rígida e articulada, e os materiais possuindo comportamento elástico linear. O objetivo do estudo era conhecer o comportamento do OR, bem como sua posição ótima ao longo da altura. Diante dos modelos propostos, em relação ao deslocamento no topo da estrutura, concluíram que a melhor opção seria posicionar o OR juntamente com o BT no topo e na metade do edifício.

Tan et al. (2015) realizaram um estudo paramétrico de um edifício alto com próprio modelo, envolvendo um OR com amortecimento viscoso. Na análise consideraram dois ORs, um fixo no topo e outro com posição variável. De forma a obter os resultados do estudo, foram modificados: a razão de rigidez entre o núcleo e as colunas externas; a posição do segundo OR amortecido; e o coeficiente de amortecimento viscoso. Sendo assim, concluíram que: a taxa de amortecimento decresce rapidamente se a relação entre as rigidezes aumentar, neste caso uma maneira de atingir um amortecimento de 5% é manter uma relação menor do que 3,7; a posição ótima do segundo OR é função da rigidez núcleo-coluna, do coeficiente de amortecimento viscoso e do modo de vibração; e, por fim, que o amortecimento modal possui mais sensibilidade em relação ao coeficiente de amortecimento viscoso do que a posição do OR e, ainda, existe a possibilidade de aumentar a taxa de amortecimento se a distância entre as colunas e o núcleo aumentar ou a relação de rigidezes diminuir.

Park et al. (2016) investigaram o projeto ótimo dos elementos que compõem sistema estrutural OR, isto é, núcleo, colunas externas e o próprio OR, num edifício alto de concreto armado com 400 m de altura. Incluíram, também, o número e a posição ótima do OR. As soluções foram obtidas através de um algoritmo genético com restrições tratadas com penalizações, onde a função objetivo é minimizar o volume do sistema estrutural contendo restrições de deslocamento no topo do edifício e de tensão de flexão na base do núcleo. Dessa forma, demonstraram que ao aumentar a quantidade de pavimentos com ORs, o volume do sistema diminuiu. Mais especificamente a seção transversal do núcleo e do OR diminuíram, enquanto as colunas externas aumentaram. Vale ressaltar que todas as soluções ótimas foram alcançadas pela condição de restrição do deslocamento no topo da estrutura.

Moon (2016) examinou o desempenho estrutural do sistema OR em edifícios altos com formatos complexos, isto é, em espiral (*twisted*), inclinado (*tilted*) e afunilado (*tapered*). Para cada um dos formatos foi verificado a influência tanto do ângulo de variação da fachada quanto a altura total da estrutura. A análise foi realizada através do *software* comercial (SAP 2000). Sendo assim, demonstram que: a rigidez lateral diminuiu com o aumento da taxa de torção e, à medida que a

altura aumenta, a redução da rigidez é mais acentuada; é preferível empregar colunas afastadas do perímetro, reduzindo a espessura do edifício, ao invés de colunas em espiral; no caso em que o formato da estrutura é inclinado, quando o ângulo de inclinação aumenta num intervalo de 0 até 13°, a resistência lateral contra o vento aumenta e, por outro lado, os deslocamentos laterais induzidos pelas cargas gravitacionais são intensificados; estruturas que se encurtam ao longo da altura são mais eficientes sob a ação do vento, quando o ângulo de encurtamento ou altura aumentam.

Chen e Zhang (2018) realizaram um estudo envolvendo um algoritmo genético multiobjetivo a partir de uma formulação matemática simplificada com o propósito de conhecer as soluções ótimas de Pareto, isto é, as diversas posições ótimas de acordo com a quantidade de ORs. Os objetivos empregados na análise foram: deslocamento no topo e momento na base do núcleo. O modelo possuía 260 m de altura com dimensões em planta de 50,8 por 43,4 m, tendo como carga horizontal o vento. Desta maneira, ao realizar a otimização, concluíram que a partir de 4 ORs a redução do deslocamento no topo da estrutura deixa de ser perceptível e, em relação ao momento na base do núcleo, esse valor é igual a 7 ORs. Além disso, observam que à medida que o número de ORs aumenta existe um decréscimo na diversidade de soluções.

Fang et al. (2018) analisaram o comportamento de um edifício super alto com 135 pavimentos (700 m de altura) sob ações dependentes do tempo como a fluência, retração e o recalque diferencial. Consideraram o efeito do processo construtivo na análise através do método *Step-by-Step*. Foram empregadas 3 formas de conexão do OR: imediata, ou seja, fixado no mesmo momento de sua implementação; com certo atraso até a construção do próximo OR; e com atraso ótimo, definido por critérios normativos, entre os quais podem ser citados a estabilidade e a rigidez global. Além disso, a fundação foi considerada como parte integrante da estrutura, por meio do elemento de mola. Os elementos que compõem a estrutura foram: colunas perimetrais de concreto com revestimento de aço, possuindo grandes dimensões e seção variável ao longo da altura; BTs de aço, que realizam a conexão das colunas externas; núcleo interno formado por colunas de concreto com revestimento de aço, ligadas por diagonais de aço; e OR treliçado de aço. Ao longo da altura existem 12 BTs e 5 ORs. Ao final do estudo concluíram que a melhor opção de conexão para reduzir a introdução de novas tensões devido ao encurtamento diferencial é considerando um atraso ótimo. No caso em que a conexão foi realizada até a implementação de um novo OR, acréscimo de tensão foi reduzido aproximadamente pela metade. Por fim, observaram que o recalque diferencial possui um efeito reverso, sendo um fenômeno favorável para igualar a diferença ocasionada pelo encurtamento diferencial axial entre as colunas e o núcleo.

Kim, Lim e Lee (2020) conduziram um estudo envolvendo 3 edifícios altos com 80 pavimentos (280 m) e diferentes formatos dos elementos verticais, tendo como objetivo obter a posição ótima

do OR treliçado ao longo da altura que minimiza o deslocamento no topo. O método do gradiente descendente com a adição de interpolações lineares e quadráticas foi empregado na otimização. A resposta da estrutura em relação à rigidez e ao número de ORs foi analisada. Além disso, foi verificada a influência do formato do carregamento de vento e melhor posição do OR com respeito ao mínimo momento na base do núcleo. Assim, provaram que ao aumentar a rigidez do OR, a melhor posição de instalação tem uma altura inferior, entretanto existe um certo valor para o qual essa influência torna-se insignificante. Considerando as cargas de vento analisadas, uniforme e triangular, a ação da introdução do OR na resposta da estrutura submetida ao vento uniforme foi maior. Por fim, observaram que os objetivos de reduzir o deslocamento no topo ou momento na base do núcleo são conflitantes. No caso de existir somente um OR, sua posição em relação ao mínimo momento na base será menor do que ao deslocamento no topo.

Xing, Zhou e Huang (2020) realizaram um estudo baseado na análise espectral sísmica de um modelo simplificado contendo um OR amortecido com o *buckling restrained braces* (BRBs). Os próprios autores propuseram e validaram o modelo com programa ANSYS. Para chegar ao objetivo final, isto é, obter a posição ótima do OR amortecido e o correspondente deslocamento no topo da estrutura, foram variados diversos parâmetros estruturais. Desde modo, concluíram que: ao aumentar a rigidez do OR, ambas funções objetivo decrescem gradualmente; ao aumentar a rigidez do núcleo ou das colunas, a posição ótima do OR sobe e o deslocamento diminui; ao aumentar a distância entre o núcleo e as colunas, a posição ótima do OR cresce e o deslocamento, em primeiro momento, decresce rapidamente e, logo após, aumenta de forma lenta; ao aumentar a força de escoamento do BRB, inicialmente ambos objetivos diminuem e, então, permanecem constantes. Por fim, foram comparados os resultados em relação ao OR convencional e concluíram que a solução com OR amortecido resultou, em todos os casos, em ambas funções objetivo menores.

Rao et al. (2021) investigaram a influência da implementação do sistema OR-BT num edifício de 30 pavimentos (105 m de altura), sendo todos os elementos compostos por aço. Para verificar a performance da estrutura submetida a vento e sismo, fixaram um OR no topo e variaram a posição do segundo a $1/3$, $1/2$ e $2/3$ da altura. Sendo assim, concluíram que a melhor opção para reduzir o máximo deslocamento lateral e o deslocamento entre pavimentos, para ambas ações, seria posicionar o segundo OR a meia altura.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 MODELO DO EDIFÍCIO ALTO

O modelo do edifício alto empregado nas análises deste estudo é baseado em Kim, Lim e Lee (2020), o qual é ilustrado na Figura 3.1. O mesmo possui 80 pavimentos com distância entre pavimentos de $3,5\text{ m}$, o que resulta numa altura total de 280 m . Seu formato em planta é regular e contém dimensões de $43 \times 43\text{ m}$. A distribuição dos elementos que compõem a estrutura são: núcleo central, colunas distribuídas em todo o perímetro e vigas e lajes entre a porção interna e externa.

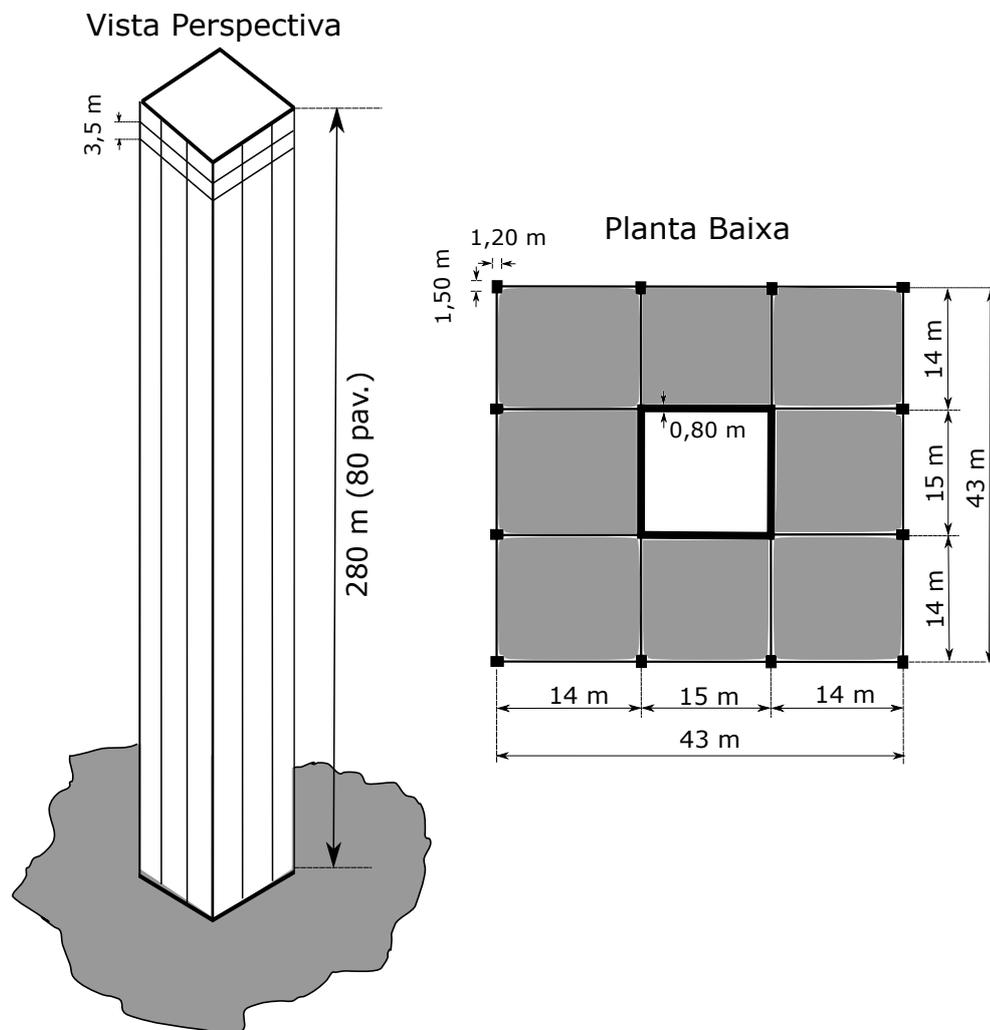


Figura 3.1 – Modelo do edifício alto

3.2 SOFTWARE ANSYS

O *software* ANSYS (*Analysis Systems Incorporated*) é um programa de simulação para engenharia que utiliza a formulação em elementos finitos para resolver problemas nos mais diversos campos da engenharia. Em relação à análise estrutural, o ANSYS disponibiliza duas interfaces, o sistema *workbench* e o sistema APDL (*ANSYS Parametric Design Language*), sendo este último o utilizado neste trabalho. Dentre os *softwares* comerciais de elementos finitos, optou-se por empregar o ANSYS devido a possibilidade de criar uma rotina parametrizável através da própria linguagem do *software*, existir uma licença estudantil, vasta biblioteca de elementos finitos disponíveis e boa documentação. No pós-processamento o programa ainda permite que o usuário visualize gráficos com resultado das análises com boa qualidade, o que melhora o entendimento do comportamento da simulação.

No Apêndice A é apresentada a rotina parametrizável do modelo do edifício alto com o sistema OR-BT na linguagem APDL desenvolvida para utilizar nas otimizações deste trabalho.

3.2.1 Elemento de casca para núcleo

O SHELL181 é um elemento finito de casca bidimensional que possui 4 nós e 6 graus de liberdade por nó (3 translações e 3 rotações), dispõe ainda de uma opção com formato triangular, como é ilustrado na Figura 3.2. É baseado na teoria de Reissner-Mindlin (deformação por corte de primeira ordem), onde a seção plana normal à superfície média permanece plana após a deformação, sendo adequado para elementos de casca fina a moderadamente espessa. Este elemento admite comportamentos lineares, não lineares e grandes deformações. Em relação às opções do elemento, destaca-se que é possível: (a) desconsiderar os graus de liberdade de rotação, transformando-o em uma membrana; (b) aplicar um esquema de integração total (2x2) ou reduzida (1x1); (c) empregar diferentes formulações em relação a sua curvatura, como, por exemplo, incorporar os efeitos iniciais da curvatura.

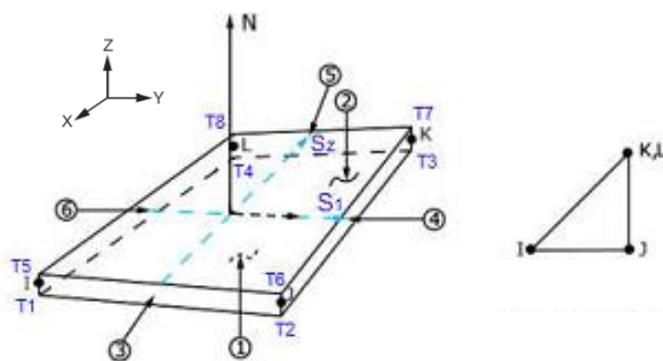


Figura 3.2 – Geometria do SHELL181 (fonte: Ansys (2021))

Este elemento é adequado para ser empregado em elementos que possuem duas dimensões

predominantes e, portanto, optou-se por utiliza-lo para modelar o núcleo rígido do edifício alto.

3.2.2 Elemento de vigas

Baseado na teoria de viga de Timoshenko, a qual inclui os efeitos da deformação por cisalhamento, o BEAM188 é um elemento finito unifilar que contém 2 nós com 6 graus de liberdade cada (3 translações e 3 rotações), como é ilustrado na Figura 3.3. Caso seja necessário considerar o empenamento da seção transversal, existe a possibilidade de acrescentar um novo grau de liberdade em cada nó. É adequado para a análise de vigas finas à moderadamente espessa, podendo ser aplicada relações lineares, não lineares e de grandes deformações. Além disso, permite que sejam consideradas mudanças nas propriedades inerciais da seção transversal devido ao alongamento axial. Outro ponto importante é que tal elemento fornece 3 funções de forma: linear, quadrática e cúbica.

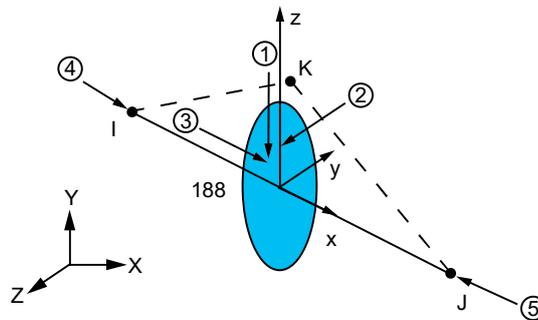


Figura 3.3 – Geometria do BEAM188 (fonte: Ansys (2021))

O nó K mostrado na Figura 3.3 é utilizado para orientar a seção transversal do elemento no espaço tridimensional.

Este elemento é apropriado para ser empregado em estruturas reticuladas e, portanto, optou-se por utiliza-lo para modelar os pilares externos do edifício alto.

3.2.3 Elemento de treliça

O LINK180 é um elemento finito de treliça unidimensional que possui 2 nós e 3 graus de liberdade por nó (3 translações), como é ilustrado na Figura 3.4. Somente esforços uniaxiais de tração e compressão são admitidos. Caso seja necessário, este elemento permite que sejam considerados apenas um dos esforços: tração ou compressão. Além disso, é capaz de realizar uma análise considerando plasticidade, fluência e grandes deformações.

Este elemento é adequado para ser empregado em elementos de treliça e, portanto, optou-se por utiliza-lo para modelar o OR, BT e as vigas do pavimento do edifício alto.

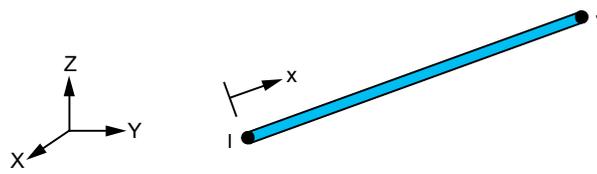


Figura 3.4 – Geometria do LINK180 (fonte: Ansys (2021))

3.3 EFEITOS DINÂMICOS DA TURBULÊNCIA DE VENTO

O modelo discreto proposto pela NBR 6123 (1988) é um procedimento simplificado para o cálculo das forças de vento considerando os efeitos dinâmicos devidos à turbulência de vento. É indicado para edificações flexíveis, como é o caso dos edifícios altos e esbeltos, com períodos fundamentais maiores que 1 segundo, nos quais a parcela flutuante pode ser significativa para uma correta avaliação da mesma. Conforme ilustrado na Figura 3.5, a estrutura deve ser discretizada em n segmentos de modo a distribuir as cargas de vento de acordo com as suas respectivas propriedades.

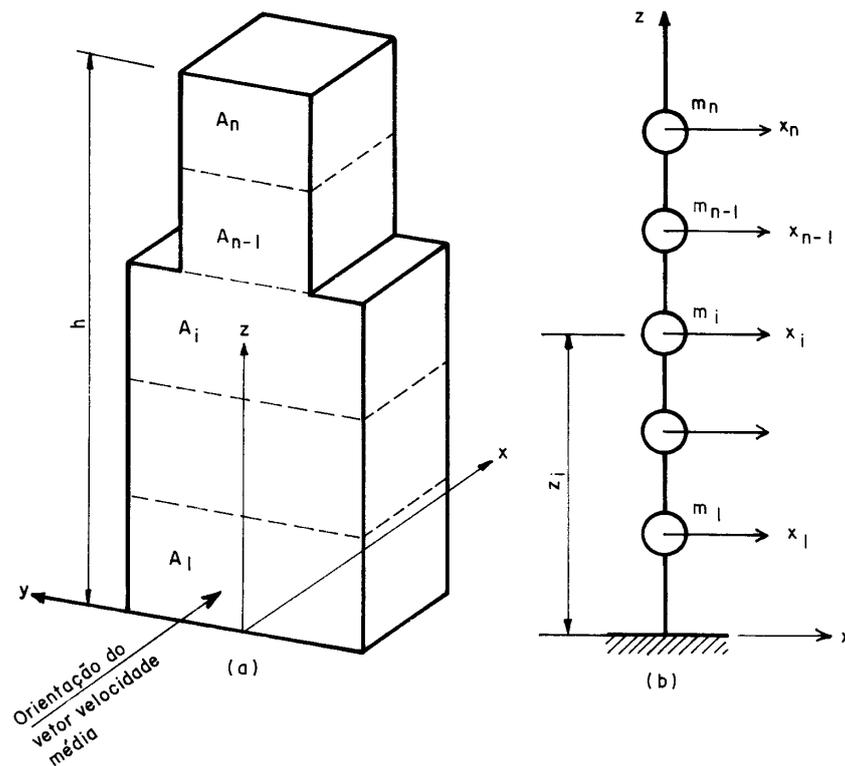


Figura 3.5 – Esquema para o modelo dinâmico discreto (fonte: NBR 6123 (1988))

Para que o escoamento de vento se desenvolva e possa excitar uma estrutura, a velocidade de projeto \bar{V}_p , é calculada para um intervalo de tempo igual a 10 minutos, sendo dada por

$$\bar{V}_p = 0,69V_oS_1S_3, \quad (3.1)$$

em que V_o é velocidade básica do vento e os parâmetros S_1 e S_3 são, respectivamente, os fatores topográfico e probabilístico.

Sabendo que para cada modo de vibração j a força total de vento na coordenada i pode ser calculada pela superposição da força média \bar{X}_i , e flutuante \hat{X}_i , tem-se que

$$\tilde{X}_i = \bar{X}_i + \hat{X}_i. \quad (3.2)$$

As forças média e flutuante são, respectivamente, dadas por

$$\bar{X}_i = \bar{q}_0 b^2 C_{ai} A_i \left(\frac{z_i}{z_r} \right)^{2p} \quad (3.3)$$

e

$$\hat{X}_i = F_H \psi_i x_i \quad (3.4)$$

em que $\bar{q}_0 = 0,613 \bar{V}_p^2$ é a pressão na altura de referência, b e p são parâmetros de correção conforme a categoria de rugosidade, z_r é a altitude de referência (10 metros), F_H é a força referente à parcela flutuante -, C_{ai} , A_i , z_i , $\psi_i = \frac{m_i}{m_0}$ e x_i são, respectivamente, o coeficiente de arrasto, área de atuação do vento, altura, razão entre a massa discreta (m_i) e a massa arbitrária de referência (m_0), e o modo de vibração - ambos na coordenada i .

A força referente à parcela flutuante pode ser calculada de acordo com

$$F_H = \bar{q}_0 b^2 A_0 \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i x_i}{\sum_{i=1}^n \psi_i x_i^2} \xi \quad (3.5)$$

em que A_0 é a área de referência, ξ é o coeficiente de amplificação dinâmica, n é o número de graus de liberdade considerados na discretização (ver Figura 3.5) e o parâmetro β_i é dado por

$$\beta_i = C_{ai} \frac{A_i}{A_0} \left(\frac{z_i}{z_r} \right)^p. \quad (3.6)$$

Caso sejam empregados mais de 1 modo de vibração na solução, pode-se combinar o resultado dos r modos empregados por meio de

$$\hat{Q} = \left[\sum_{j=1}^r \hat{Q}_j^2 \right]^{1/2} \quad (3.7)$$

em que \hat{Q}_j pode ser uma variável estática ou geométrica qualquer (força, tensão, deformação).

A aceleração no modo j , induzida pelas forças flutuantes, pode ser estimada através da seguinte equação

$$a_j = 4\pi^2 f_j^2 \hat{u}_j \quad (3.8)$$

em que f_j e \hat{u}_j são, respectivamente, a frequência e o deslocamento devido a parcela flutuante no nível z , ambos no modo j .

3.3.1 Cálculo da ação do vento segundo a NBR6123/88

O carregamento lateral de vento foi aplicado conforme o procedimento apresentado na seção 3.3, considerando que o modelo do edifício alto se localiza no centro de Porto Alegre (Categoria V). Neste caso, tem-se que a velocidade básica é igual a $V_0 = 46 \text{ m/s}$. Por ser considerado num ambiente plano e alto fator de ocupação, ambos os fatores de correção, S_1 e S_3 , foram adotados como sendo unitários. Sabendo que o modelo se encaixa na categoria V, da tabela 20 da NBR 6123 (1988) tem-se que o expoente $p = 0,31$ e o parâmetro $q = 0,5$. A partir das dimensões do modelo, chega-se aos valores de $l_1/l_2 = 1$ e $H/l_1 = 6,5$, o que para um vento de alta turbulência fornece um coeficiente de arrasto $C_a = 1,1$.

Tendo em vista que a cada iteração da otimização a estrutura muda de configuração, o modo de vibração x_i e a frequência fundamental f_j são constantemente atualizados no código em APDL. O modo de vibração empregado é calculado pela média dos deslocamentos por pavimento, obtido através de uma análise modal. Além disso, como o coeficiente de amplificação dinâmica ξ depende da frequência do modelo, utilizam-se equações geradas a partir da figura 18 da NBR 6123 (1988) por meio de uma linha de tendência polinomial de grau 2 para o caso em que a razão de amortecimento é igual a 2%.

Quando a relação $l_1/H = 0$, o coeficiente de amplificação dinâmica pode ser determinado pelas seguintes equações

$$\xi_{H=100} = -55,849 \left(\frac{\bar{V}_p}{f_j L} \right)^2 + 15,428 \left(\frac{\bar{V}_p}{f_j L} \right) + 1,0552 \quad (3.9)$$

e

$$\xi_{H=300} = -57,895 \left(\frac{\bar{V}_p}{f_j L} \right)^2 + 12,352 \left(\frac{\bar{V}_p}{f_j L} \right) + 0,5661 \quad (3.10)$$

em que $L = 1800 \text{ m}$ é a dimensão característica.

E quando a relação $l_1/H \geq 0,2$, empregam-se as equações

$$\xi_{H=100} = -44,859 \left(\frac{\bar{V}_p}{f_j L} \right)^2 + 11,404 \left(\frac{\bar{V}_p}{f_j L} \right) + 0,9314 \quad (3.11)$$

e

$$\xi_{H=300} = -31,547 \left(\frac{\bar{V}_p}{f_j L} \right)^2 + 6,8008 \left(\frac{\bar{V}_p}{f_j L} \right) + 0,4945. \quad (3.12)$$

Como a relação l_1/H e a altura do modelo possuem valores diferentes daqueles que são referências para empregar diretamente os ábacos da NBR 6123 (1988), realizou-se uma interpolação linear para chegar no resultado correspondente ao do modelo.

Desta maneira, é possível verificar na Figura 3.6 o formato do perfil das cargas laterais de vento considerando os efeitos dinâmicos da turbulência. Percebe-se que as ações aplicadas ao modelo

numérico do edifício alto iniciam com baixas intensidades, o que é característico de centros de cidades com muitos obstáculos, e se desenvolvem ao longo da altura de acordo com a lei potencial da NBR 6123 (1988).

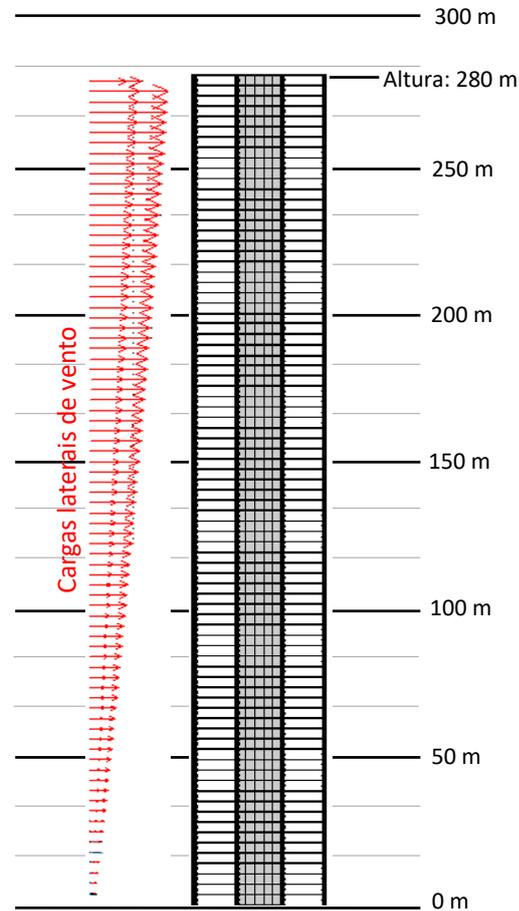


Figura 3.6 – Carga lateral de vento aplicada ao modelo do edifício alto

3.4 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

3.4.1 Formulação do problema

As funções objetivo a serem otimizadas são: o máximo deslocamento no topo e o momento na base do núcleo. Para tal, são introduzidos uma quantidade definida de ORs/ORs-BTs a cada otimização e, então, se obtém o resultado separadamente de cada objetivo. A quantidade de variáveis de projeto depende do número de ORs/ORs-BTs que serão posicionados ao longo da altura do edifício alto. A formulação do primeiro problema é dada por:

Minimize:

$$f_1(\mathbf{x}) = \Delta_{topo}, \quad (3.13)$$

sujeito a

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &\in \mathbb{Z}^n, \\ x_{i,min} &\leq x_i \leq x_{i,max} \quad i = 1, \dots, n, \\ |x_i - x_{i+1}| &\leq h_{or} \quad i = 1, \dots, n - 1; \end{aligned}$$

em que \mathbf{x} são as variáveis de projeto (pavimentos com ORs/ORs-BTs), Δ_{top} é o MDL, h_{or} é a altura do OR, \mathbb{Z}^n é o conjunto de variáveis inteiras, n é número de variáveis de projeto, $x_{i,min}$ e $x_{i,max}$ representam, respectivamente, os limites inferiores e superiores.

Já o segundo problema é dado por:

Minimize:

$$f_2(\mathbf{x}) = M_{nucleo} = \sqrt{(\sum M_x + \sum F_z d_y)^2 + (\sum M_y + \sum F_z d_x)^2}, \quad (3.14)$$

sujeito a

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &\in \mathbb{Z}^n, \\ x_{i,min} &\leq x_i \leq x_{i,max} \quad i = 1, \dots, n, \\ |x_i - x_{i+1}| &\leq h_{or} \quad i = 1, \dots, n - 1; \end{aligned}$$

em que M_{nucleo} é o MBN, que é calculado pela resultante do somatório de momentos em torno dos eixos que formam o plano da base do núcleo.

A minimização de cada um destes problemas é realizada através do algoritmo Nelder-Mead modificado para variáveis inteiras, o qual é apresentado na subseção 3.4.2.1. As restrições são tratadas através de penalizações. Vale ressaltar que os limites são definidos conforme o número de pavimentos e também pela quantidade de pavimentos que integram um único OR/OR-BT. Neste caso, como apresentado no Capítulo 4, os limites laterais são do 4º até o 80º pavimento e para evitar que exista sobreposição de ORs/ORs-BTs, a diferença de altura entre ORs/ORs-BTs deve sempre ser superior a 4 pavimentos.

A linguagem utilizada para realizar a conexão entre o código e o ANSYS APDL foi o *python*. Em primeiro momento define-se quantos ORs existem e suas condições de contorno e, a partir disso, iniciam-se as iterações através do algoritmo Nelder-Mead de modo a encontrar a posição ótima dos ORs que minimizam a função objetivo de interesse.

3.4.2 Otimização mono-objetivo

3.4.2.1 Método Nelder-Mead

Introduzido por Nelder e Mead (1965), o Nelder-Mead é um método numérico que tem por objetivo realizar a minimização ou maximização de funções matemáticas. Segundo Arora (2004),

é um método de busca direta que não utiliza gradientes em seu procedimento de solução, podendo ainda resolver funções não lineares. Sua abordagem é baseada na comparação dos valores da função objetivo de $n + 1$ vértices de uma configuração geométrica conhecida como *simplex*, sendo que n é o número de variáveis de projeto. No caso de uma função com apenas duas variáveis, o problema é considerado bidimensional, sendo o *simplex* um triângulo formado por três vértices.

A cada iteração do algoritmo Nelder-Mead busca-se melhorar o pior vértice do *simplex* através de algumas operações: reflexão, expansão ou contração. A perturbação da função de pior resultado é sempre na direção da média dos n vértices restantes. Caso o resultado de nenhuma das operações for aceitável, aproxima-se todos os vértices na direção daquela com melhor resultado da função objetivo (NOCEDAL; WRIGHT, 2006). Este é o algoritmo tradicional e pode ser visto em Nocedal e Wright (2006). Entretanto, neste trabalho verificou-se através de funções *benchmark* que este procedimento é muito suscetível a permanecer em mínimos locais e, portanto, não se obtêm o mínimo global. Por este motivo, foram propostas modificações no algoritmo de modo que o mesmo possa evitar situações indesejáveis num processo de otimização.

O algoritmo Nelder-Mead modificado apresentado a seguir segue o mesmo passo a passo do original. No entanto, neste caso, foram introduzidas: aleatoriedades em cada uma das operações citadas anteriormente; nova operação, quando todas os vértices são idênticos; e vértices somente com variáveis inteiras objetivando lidar com problemas de programação inteira.

Para iniciar o algoritmo é necessário informar, pelo menos, os $x_i = [x_1, x_2, \dots, x_{n+1}]$ pontos iniciais para que o programa possa começar as iterações. Deste modo, respeitando o limite inferior, $l_j = [x_{1,min}, x_{2,min}, \dots, x_{n,min}]$, bem como o superior, $u_j = [x_{1,max}, x_{2,max}, \dots, x_{n,max}]$, os vértices são distribuídos de forma aleatória dentro do espaço de busca, dado por

$$x_{i,j} = \text{round} [l_j + lhs_{i,j} (u_j - l_j)] \quad (i = 1, \dots, n + 1) (j = 1, \dots, n) \quad (3.15)$$

em que $lhs_{i,j}$ é uma variável aleatória definida pela amostragem por hipercubo latino¹, *round* representa a operação de arredondamento para o número inteiro mais próximo, i é o índice do vértice e j é o índice das variáveis de projeto.

Sempre no início de cada iteração todos os vértices são organizadas em ordem crescente de modo que

$$f(\mathbf{x}_1) \leq f(\mathbf{x}_2) \leq \dots \leq f(\mathbf{x}_{n+1}) \quad (3.16)$$

e, portanto, o centroide pode ser calculado de acordo com

$$\bar{\mathbf{x}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3.17)$$

¹ É um método estatístico para gerar uma distribuição de amostragem quase aleatória.

A primeira operação a ser realizada é a reflexão, denotada por \mathbf{x}_r . Neste caso, aplica-se uma perturbação em \mathbf{x}_{n+1} na direção do centroide dos n vértices restantes e avalia-se o seu resultado. Caso $f(\mathbf{x}_1) \leq f(\mathbf{x}_r) < f(\mathbf{x}_n)$, então substitui-se \mathbf{x}_{n+1} por \mathbf{x}_r e se recomeça uma nova iteração. A Figura 3.7 (a) ilustra, para um caso bidimensional, a operação de reflexão considerando a implementação de aleatoriedades normalizadas sob o centroide $\bar{\mathbf{x}}$, de modo que existe a possibilidade da direção de reflexão seja inclinada em relação a original.

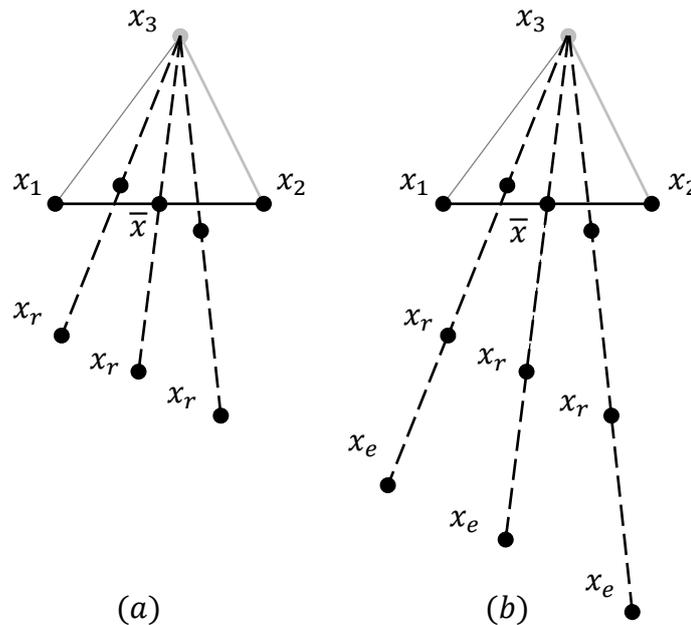


Figura 3.7 – (a) Reflexão (b) Expansão

A expressão matemática que define a reflexão fica modificada e assume a seguinte forma:

$$\mathbf{x}_r = \text{round} [\bar{\mathbf{x}} (1 + c_n \mathbf{R}_{normal}) + \alpha (\bar{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_{n+1})] \quad (3.18)$$

em que c_n é um coeficiente redutor, \mathbf{R}_{normal} é um vetor contendo amostras de uma distribuição normal padrão (média 0 e desvio 1) e α é o coeficiente de reflexão original do algoritmo Nelder-Mead.

Por outro lado, se o resultado obtido pela reflexão for $f(\mathbf{x}_r) < f(\mathbf{x}_1)$, então explora-se um ponto mais distante através da operação de expansão, o qual é definido por \mathbf{x}_e . Caso $f(\mathbf{x}_e) < f(\mathbf{x}_r)$, substitui-se \mathbf{x}_{n+1} por \mathbf{x}_e e recomeça uma nova iteração. Contudo, se $f(\mathbf{x}_e) > f(\mathbf{x}_r)$, o vértice a ser incorporado ao *simplex* é o \mathbf{x}_r . A operação expansiva, para um caso bidimensional, pode ser vista na Figura 3.7 (b), incluindo a incorporação das aleatoriedades, que é dada por

$$\mathbf{x}_e = \text{round} [\bar{\mathbf{x}} (1 + c_n \mathbf{R}_{normal}) + \beta (\bar{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_{n+1})] \quad (3.19)$$

em que β é o coeficiente de expansão original do algoritmo Nelder-Mead.

Sabe-se, então, que $f(\mathbf{x}_r) \geq f(\mathbf{x}_n)$. Logo, é necessário aplicar uma perturbação menor em \mathbf{x}_{n+1} , a fim de encontrar um novo ponto com um valor da função objetivo melhor. Assim, caso $f(\mathbf{x}_n) \leq f(\mathbf{x}_r) < f(\mathbf{x}_{n+1})$ aplica-se uma contração externa, indicada por \mathbf{x}_c . Se $f(\mathbf{x}_c) \leq f(\mathbf{x}_r)$ substitui-se \mathbf{x}_{n+1} por \mathbf{x}_c e inicia-se o processo novamente. Caso contrario, todas os vértices aproximam-se de \mathbf{x}_1 . A Figura 3.8 (a) ilustra a operação de contração externa.

Em contrapartida, se $f(\mathbf{x}_r) > f(\mathbf{x}_{n+1})$, então aplica-se uma contração interna, que também é expressa por \mathbf{x}_c . Se $f(\mathbf{x}_c) < f(\mathbf{x}_{n+1})$ substitui-se \mathbf{x}_{n+1} por \mathbf{x}_c e inicia-se uma nova iteração. Caso contrario, todas os vértices aproximam-se de \mathbf{x}_1 . A Figura 3.8 (b) ilustra a operação de contração interna.

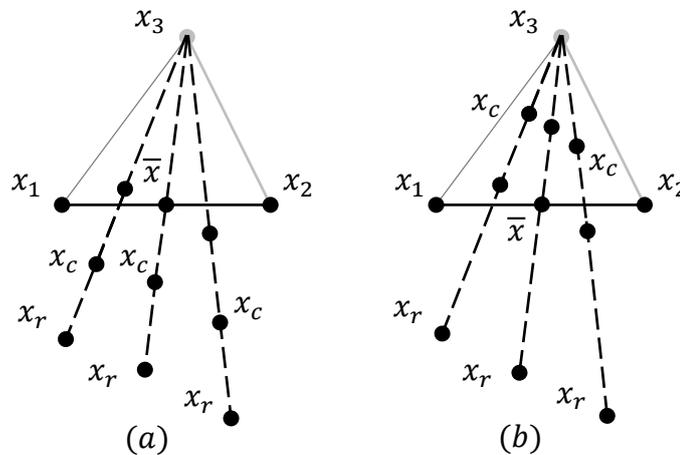


Figura 3.8 – (a) Contração externa (b) Contração interna

As expressões matemáticas que definem as contrações externa e interna, respectivamente, são

$$\mathbf{x}_c = \text{round} [\bar{\mathbf{x}} (1 + c_n \mathbf{R}_{normal}) + \gamma_e (\bar{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_{n+1})] \quad (3.20)$$

e

$$\mathbf{x}_c = \text{round} [\bar{\mathbf{x}} (1 + c_n \mathbf{R}_{normal}) + \gamma_i (\bar{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_{n+1})] \quad (3.21)$$

em que γ_e é o coeficiente de contração externa e γ_i é o coeficiente de contração interna originais do algoritmo Nelder-Mead.

A última alternativa, como já foi mencionada, é aproximar todos os pontos a \mathbf{x}_1 , a qual pode ser denominada de redução, conforme a Figura 3.9 (a). Esta pode ser calculado de acordo com

$$\mathbf{x}_i = \text{round} \left[\mathbf{x}_1 + \left(\frac{1}{2} + c_n \mathbf{R}_{normal} \right) (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_i) \right] \quad (i = 2, 3, \dots, n+1). \quad (3.22)$$

Além disso, antes de aplicar a redução sempre é verificado se todos vértices são idênticos, ou seja, $(\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}_2 = \dots = \mathbf{x}_{n+1})$. Caso essa condição seja verdadeira, \mathbf{x}_1 é armazenado e, então, aplica-se

uma perturbação aleatória à \mathbf{x}_1 , conforme é ilustrado na Figura 3.9 (b). A expressão é dada por

$$\mathbf{x}_i = \text{round}(\mathbf{x}_1 + c_d \mathbf{R}_{normal}) \quad (i = 2, 3, \dots, n + 1) \quad (3.23)$$

em que c_d é o coeficiente de dilatação.

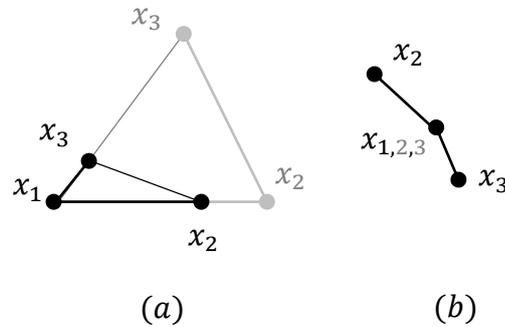


Figura 3.9 – (a) Redução (b) Dilatação

Como dito anteriormente, todos os coeficientes empregados nas operações são os mesmos propostos por Nelder e Mead (1965) no método original. Na Tabela 3.1 é possível verificar ambos os coeficientes citados. Já os inseridos na nova programação, c_n e c_d , foram escolhidos de acordo com os melhores resultados obtidos através de testes sobre as *benchmarks* da subseção 3.4.2.2.

Tabela 3.1 – Parâmetros do algoritmo Nelder-Mead modificado

Parâmetros	Valor
Coeficiente de reflexão (α)	1
Coeficiente de expansão (β)	2
Coeficiente de contração externa (γ_e)	0,5
Coeficiente de contração interna (γ_i)	-0,5
Coeficiente redutor (c_n)	0,1
Coeficiente de dilatação (c_d)	0,5

De modo a resumir o que foi explicitado anteriormente, é proposto um pseudocódigo, o qual pode ser visto no Algoritmo 1.

Como é utilizado um *software* comercial para retirar os resultados de interesse na otimização do problema em estudo, toda vez que a função objetivo é chamada, demanda-se um esforço computacional de alguns segundos. Deste modo, para que fosse possível acelerar este processo, criou-se um banco de dados. Tal procedimento possibilita que, toda vez que no processo de otimização for encontrado um valor que já esteja no banco de dados, não seja necessário chamar novamente a função, pois a análise para essas variáveis de projeto já foi realizada ao menos uma vez.

3.4.2.2 Funções *benchmark*

Com o propósito de validar a programação proposta na subseção 3.4.2.1, buscou-se funções *benchmark* na literatura para problemas de minimização. Luchi e Krohling (2015) sugerem 8 funções para variáveis inteiras, as quais são listas abaixo.

Benchmark 1:

Minimize:

$$f(\mathbf{x}) = x_1^2 + x_2^2 + 3x_3^2 + 4x_4^2 + 2x_5^2 - 8x_1 - 2x_2 - 3x_3 - x_4 - 2x_5 \quad (3.24)$$

sujeito a

$$x_1 + 2x_2 + 2x_3 + x_4 + 6x_5 \leq 800$$

$$2x_1 + x_2 + 6x_3 \leq 200$$

$$x_3 + x_4 + 5x_5 \leq 200$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \geq 48$$

$$x_2 + x_4 + x_5 \geq 34$$

$$6x_1 + 7x_5 \geq 104$$

$$55 \leq x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \leq 400.$$

Os limites inferiores e superiores são $0 \leq x_i \leq 99$ ($i = 1, \dots, 5$). A solução ótima é $\mathbf{x} = (16, 22, 5, 5, 7)$ com $f(\mathbf{x}) = 807$.

Benchmark 2:

Minimize:

$$f(\mathbf{x}) = -[1 - (1 - 0,98)^{x_1} (1 - 0,92)^{x_2}] \quad (3.25)$$

sujeito a

$$11x_1 + 5x_2 \leq 23$$

$$4x_1 + 6x_2 \leq 12$$

$$x_1 + x_2 \geq 1$$

Os limites inferiores e superiores são $0 \leq x_i \leq 10$ ($i = 1, 2$). A solução ótima é $\mathbf{x} = (2, 0)$ com $f(\mathbf{x}) = -0,9996$.

Benchmark 3:

Minimize:

$$f(\mathbf{x}) = -(13x_1 - 5x_2^2 + 30, 2x_2 - x_1^2 + 10x_3 + 2, 5x_3^2) \quad (3.26)$$

sujeito a

$$2x_1 + 4x_2 + 5x_3 \leq 10$$

$$x_1 + x_2 + x_3 \leq 5$$

Os limites inferiores e superiores são $0 \leq x_i \leq 30$ ($i = 1, 2, 3$). A solução ótima é $\mathbf{x} = (3, 1, 0)$ com $f(\mathbf{x}) = -55,2$.

Benchmark 4:

Minimize:

$$f(\mathbf{x}) = x_1^2 - x_2^2 + 2x_3^2 + x_4^2 - 5x_1 - 5x_2 - 21x_3 + 7x_4 \quad (3.27)$$

sujeito a

$$\sum_{i=1}^4 x_i + \sum_{i=0}^3 (-1)^i x_{i+1} \leq 8$$

$$x_1 - 1 + 2x_2^2 + x_3^2 + x_4(2x_4 - 1) \leq 10$$

$$2x_1(x_1 + 1) + x_2(x_2 - 1) + x_3^2 - x_4 \leq 5$$

Os limites inferiores e superiores são $-5 \leq x_i \leq 5$ ($i = 1, 2, 3, 4$). A solução ótima é $\mathbf{x} = (0, 1, 2, -1)$ com $f(\mathbf{x}) = -44$.

Benchmark 5:

Minimize:

$$f(\mathbf{x}) = 5 \sum_{i=1}^4 x_i - 5 \sum_{i=1}^4 x_i^2 - \sum_{i=5}^{13} x_i \quad (3.28)$$

sujeito a

$$2x_1 + 2x_2 + x_{10} + x_{11} - 10 \leq 0$$

$$2x_1 + 2x_3 + x_{10} + x_{12} - 10 \leq 0$$

$$2x_2 + 2x_3 + x_{11} + x_{12} - 10 \leq 0$$

$$-2x_4 - x_5 + x_{10} \leq 0$$

$$-2x_6 - x_7 + x_{11} \leq 0$$

$$-2x_8 - x_9 + x_{12} \leq 0$$

Os limites inferiores e superiores são $0 \leq x_i \leq 1$ ($i = 1, \dots, 9$), $0 \leq x_i \leq 100$ ($i = 10, 11, 12$) e $0 \leq x_{13} \leq 1$. A solução ótima é $\mathbf{x} = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 3, 3, 3, 1)$ com $f(\mathbf{x}) = -15$.

Benchmark 6:

Minimize:

$$f(\mathbf{x}) = x_1^2 + x_1 x_2 2x_2^2 - 6x_1 - 2x_2 - 12x_3 \quad (3.29)$$

sujeito a

$$2x_1^2 + x_2^2 \leq 15$$

$$-x_1 - 2x_2 + x_3 \leq 3$$

Algoritmo 1: Nelder-Mead Modificado

início

Inicialização de acordo com a Equação 3.15;

enquanto *critério o não é alcançado* **faça**

Organizar em ordem crescente de acordo com a Equação 3.16;

Calcular o centróide de acordo com a Equação 3.17;

Aplicar a Equação 3.18 e avalie-a;

se $f(\mathbf{x}_1) \leq f(\mathbf{x}_r) < f(\mathbf{x}_n)$ **então** | substituir \mathbf{x}_{n+1} por \mathbf{x}_r e ir para uma nova iteração; **senão se** $f(\mathbf{x}_r) < f(\mathbf{x}_1)$ **então**

| Aplicar a Equação 3.19 e avalie-a;

se $f(\mathbf{x}_e) < f(\mathbf{x}_r)$ **então** | substituir \mathbf{x}_{n+1} por \mathbf{x}_e e ir para uma nova iteração; **senão** | substituir \mathbf{x}_{n+1} por \mathbf{x}_r e ir para uma nova iteração; **fim** **senão** **se** $f(\mathbf{x}_n) \leq f(\mathbf{x}_r) < f(\mathbf{x}_{n+1})$ **então**

| Aplicar a Equação 3.20 e avalie-a;

se $f(\mathbf{x}_c) \leq f(\mathbf{x}_r)$ **então** | substituir \mathbf{x}_{n+1} por \mathbf{x}_c e ir para uma nova iteração; **fim** **senão**

| Aplicar a Equação 3.21 e avalie-a;

se $f(\mathbf{x}_c) \leq f(\mathbf{x}_{n+1})$ **então** | substituir \mathbf{x}_{n+1} por \mathbf{x}_c e ir para uma nova iteração; **fim** **fim** **se** $(x_1 = x_2 = \dots = x_{n+1})$ **então** | Manter \mathbf{x}_1 e substituir as demais aplicando a Equação 3.23;

| Ir para uma nova iteração;

fim Manter \mathbf{x}_1 e substituir as demais aplicando Equação 3.22;

Ir para uma nova iteração;

fim**fim****fim**

Os limites inferiores e superiores são $0 \leq x_i \leq 10$ ($i = 1, 2, 3$). A solução ótima é $\mathbf{x} = (2, 0, 5)$ com $f(\mathbf{x}) = -68$.

Benchmark 7:

Minimize:

$$f(\mathbf{x}) = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2 \quad (3.30)$$

sujeito a

$$x_1 + 2x_2 + x_4 \geq 4$$

$$x_2 + 2x_3 \geq 3$$

$$x_1 + 2x_5 \geq 5$$

$$x_1 + 2x_2 + 2x_3 \leq 6$$

$$2x_1 + x_3 \leq 4$$

$$x_1 + 4x_5 \leq 13$$

Os limites inferiores e superiores são $0 \leq x_i \leq 3$ ($i = 1, \dots, 5$). A solução ótima é $\mathbf{x} = (1, 1, 1, 1, 2)$ com $f(\mathbf{x}) = 8$.

Benchmark 8:

Minimize:

$$f(\mathbf{x}) = x_1x_7 + 3x_2x_6 + x_3x_5 + 7x_4 \quad (3.31)$$

sujeito a

$$x_1 + x_2 + x_3 \geq 6$$

$$x_4 + x_5 + 6x_6 \geq 8$$

$$x_1x_6 + x_2 + 3x_5 \geq 7$$

$$4x_2x_7 + 3x_4x_5 \geq 25$$

$$3x_1 + 2x_3 + x_5 \geq 7$$

$$3x_1x_3 + 6x_4 + 4x_5 \leq 20$$

$$4x_1 + 2x_3 + x_6x_7 \leq 15$$

Os limites inferiores e superiores são $0 \leq x_i \leq 4$ ($i = 1, 2, 3$), $0 \leq x_i \leq 2$ ($i = 4, 5, 6$) e $0 \leq x_7 \leq 6$. A solução ótima é $\mathbf{x} = (0, 2, 4, 0, 2, 1, 4)$ com $f(\mathbf{x}) = 14$.

A seguir são apresentados os resultados das funções *benchmark* obtidos através da otimização pelo algoritmo Nelder-Mead para um número de chamadas igual a 20. Na Tabela 3.2 é possível verificar os resultados para o caso em que apenas foram consideradas modificações para considerar variáveis inteiras e, na Tabela 3.3, os resultados quando são impostas as modificações

sugeridas pelo autor. Em ambas as tabelas a média dos resultados, desvio padrão e média de iterações são calculados sobre os 20 valores obtidos na otimização, sendo que cada análise é inicializada de forma aleatória.

Tabela 3.2 – Resultados do Nelder-Mead original

<i>Benchmark</i>	Melhor resultado (Nº vezes)	Média dos resultados	Desvio padrão	Média de iterações
1	807 (1)	3397,25	3782,9	292
2	-0,9996 (12)	1549	6756,29	38
3	-55,2 (4)	1164,72	2875,6	331
4	-44 (3)	-25,6	15,57	45
5	-15 (2)	-6,2	21,96	338
6	-68 (14)	43,6	189,73	23
7	8 (4)	38,15	43,25	124
8	14 (5)	30,6	33,18	413

Tabela 3.3 – Resultados do Nelder-Mead modificado

<i>Benchmark</i>	Melhor resultado (Nº vezes)	Média dos resultados	Desvio padrão	Média de iterações
1	807 (20)	807	0	427
2	-0,9996 (20)	-0,9996	0	45
3	-55,2 (20)	-55,2	0	421
4	-44 (20)	-44	0	66
5	-15 (20)	-15	0	501
6	-68 (20)	-68	0	30
7	8 (20)	8	0	160
8	14 (16)	14,4	0,8	505

Ao comparar os resultados entre as duas tabelas para as 8 funções *benchmark* empregadas, conclui-se que as modificações implementadas pelo autor são fundamentais para o sucesso do algoritmo. Tais modificações possibilitam que durante o processo de otimização, caso o algoritmo encontre um mínimo local, após algumas tentativas, ele possa deixar o mesmo, principalmente pela operação de dilatação. Além disso, ao mudar de direção a média dos n vértices, o algoritmo pode encontrar um caminho alternativo em outra direção que não seja exatamente o dos melhores vértices.

É importante destacar que o critério de parada utilizado é de extrema importância para que o algoritmo seja efetivo. O critério empregado foi: após um certo número de iterações sem que o melhor vértice seja alterado o processo é finalizado. Isso permite que o procedimento continue mesmo quando todos vértices sejam idênticos, evitando, em muitos casos, que o algoritmo fique estagnado num mínimo local.

3.4.3 Otimização multiobjetivo

Quando o problema de otimização envolve duas ou mais funções objetivo, este é conhecido como otimização multiobjetivo. A expressão matemática que representa o problema pode ser escrita como:

Minimize:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})\}^T \quad (3.32)$$

sujeito a

$$g_i(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (i = 1, \dots, p)$$

$$h_j(\mathbf{x}) = 0 \quad (j = 1, \dots, k)$$

em que $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ é o vetor de m funções objetivo a serem minimizadas simultaneamente, p é o número de restrições de desigualdade, e k é o número de restrições de igualdade.

Na otimização com múltiplos objetivos conflitantes, cada uma das funções que integram o problema possui variáveis de projeto ótimas cujos valores são diferentes para se obter o melhor resultado em cada função individualmente. Portanto, não existe apenas uma única solução ótima simultânea para todas as funções, mas um conjunto de soluções igualmente viáveis, o que oferece ao projetista mais liberdade para a tomada de decisões. É importante destacar que apenas soluções não-dominadas entre si podem ser consideradas como parte integrante deste conjunto de soluções. Deste modo, o conceito de dominância de Pareto deve ser atendido para que a solução seja viável. Na Figura 3.10 é possível verificar este conceito para um exemplo com duas funções objetivo. Neste caso, nota-se uma série de pontos situados dentro do espaço de critério viável \mathbf{Z} , e que atendem ao espaço de projeto viável \mathbf{S} , ou seja,

$$\mathbf{Z} = \{f(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in \mathbf{S}\}. \quad (3.33)$$

Observando a divisão de quadrantes a partir do ponto de referência C , conclui-se que os pontos dos quadrantes II e IV são indiferentes com C , já os pontos dos quadrantes I e III são, respectivamente, dominados e dominantes em relação a C . É visível que o conjunto de pontos mais próximos dos eixos formam a fronteira de Pareto. Caso A e B não fizessem parte de \mathbf{Z} , não existiriam pontos que dominassem C e, portanto, C iria ser incluído nas soluções de Pareto (condição de fronteira de Pareto não convexa).

De modo geral, segundo Arora (2004) o conceito de dominância pode ser definido como: um vetor de funções objetivo no espaço de critério viável \mathbf{Z} , $\mathbf{f}^* = \mathbf{f}(\mathbf{x}^*)$ é dito não dominado se, e somente se, não há outro vetor \mathbf{f} no conjunto \mathbf{Z} , tal que $\mathbf{f} \leq \mathbf{f}^*$, com ao menos uma $f_i < f_i^*$. Caso contrário, \mathbf{f}^* é dito dominado por \mathbf{f} .

Existem diversos métodos para resolver problemas de otimização multiobjetivo, os quais podem ser citados: (a) algoritmo genético; (b) soma ponderada; (c) mín-máx ponderado; (d) função de

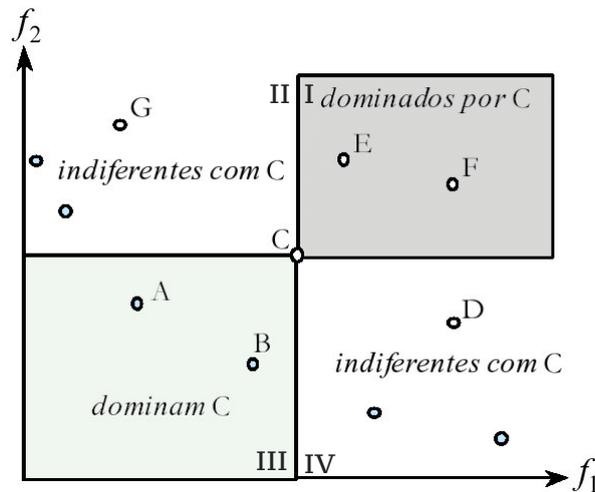


Figura 3.10 – Conceito de dominância para um problema de minimização com duas funções objetivo (fonte: Arroyo (2002) modificado)

utilidade; (e) lexicográfico; (f) restrição ε ; e (g) programação de metas. Cada um destes métodos possui suas particularidades, e sua eficiência depende do comportamento das funções objetivo. Os algoritmos genéticos, por exemplo, são baseados no conceito de dominância e apresentam um bom desempenho para uma grande quantidade de problemas, entretanto requerem um elevado número de avaliações da função de aptidão. Já os métodos que envolvem atribuição de pesos, como é o caso do método da função de utilidade, em geral, apresentam rápida convergência e lidam facilmente com a verificação das restrições do problema, no entanto, não conseguem obter soluções na porção não convexa (quando existe) da fronteira de Pareto.

Especificamente no caso de problemas de otimização inteira, com variáveis de projeto que podem assumir apenas valores inteiros, o mesmo ocorrerá com a fronteira de Pareto, sendo a mesma definida apenas por alguns pontos, com uma quantidade finita. Desta forma, a vantagem do melhor espalhamento dos pontos pelos métodos que usam o conceito de dominância perde a sua força, sendo a definição da fronteira dita finalizada nestes problemas de variáveis inteiras, quando todos os possíveis pontos podem ser enumerados.

3.4.3.1 Método da função de utilidade

Conforme já definido anteriormente, ambas funções objetivo, f_1 e f_2 , participam da otimização multiobjetivo. O método da função de utilidade foi o escolhido nesse estudo, pois ele permite o uso do algoritmo de otimização mono-objetivo criado para variáveis inteiras. Esse método atribui pesos para cada uma das funções objetivo, sendo que o somatório dos pesos deve ser unitário. Portanto, é possível priorizar uma das funções aumentando seu peso na otimização. Segundo Arora (2004), embora essa abordagem seja a mais comum dentre os métodos de otimização multiobjetivo, como é visto posteriormente, a mesma converge para uma quantidade definida de

valores ótimos à medida que o valor do peso empregado diminui.

O problema contendo ambas as funções, pode ser definido sendo:

Minimize:

$$f(\mathbf{x}) = \omega f_1(\mathbf{x}) + (1 - \omega) f_2(\mathbf{x}), \quad (3.34)$$

sujeito a

$$\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^n,$$

$$x_{i,min} \leq x_i \leq x_{i,max} \quad i = 1, \dots, n,$$

$$|x_i - x_{i+1}| \leq h_{or} \quad i = 1, \dots, n - 1;$$

em que ω é o fator peso que varia de 0 até 1.

Diante da Equação 3.34 é possível constatar que ao combinar ambas as funções objetivo, o problema torna-se mais simples e pode ser resolvido através de um algoritmo de otimização mono-objetivo. Por outro lado, a convergência desse método depende da discretização de peso ($d\omega$) adotada, que define o intervalo entre o conjunto de pesos. A quantidade de fatores peso empregado na equação pode ser calculado por $N_p = 1/d\omega + 1$, portanto a distribuição será $\Omega = \{0, d\omega, 2d\omega, \dots, 1\}$. Vale ressaltar que no momento em que ω é igual a 0 ou 1, um dos objetivos passa a não influenciar na otimização. Neste caso, o problema comporta-se como uma otimização mono-objetivo, sendo seus resultados os extremos da distribuição de Pareto. Como a fronteira é composta por um número definido, haverá um limite para de discretização do ω , o qual não implicará em encontrar novas soluções.

4 MODELO E ANÁLISE DO EDIFÍCIO ALTO

4.1 MODELO NUMÉRICO DO EDIFÍCIO ALTO

A representação de uma parte do modelo numérico em elementos finitos é apresentada na Figura 4.1. Nota-se que para melhorar a visualização, os elementos são representados com espessura, sendo eles: núcleo de concreto com módulo de elasticidade $E = 3,96 \times 10^4 \text{ MPa}$, coeficiente Poisson $\nu = 0,2$ e espessura de $t = 0,8 \text{ m}$; ORs e BTs treliçados de aço com módulo de elasticidade $E = 210 \times 10^3 \text{ MPa}$, coeficiente Poisson $\nu = 0,3$ e relação entre as áreas das barras das horizontais e diagonais de $A_{diag} = A_{hor}\sqrt{2}$, sendo seus valores definidos posteriormente através de um estudo; colunas perimetrais com módulo de elasticidade $E = 3,96 \times 10^4 \text{ MPa}$, coeficiente Poisson $\nu = 0,2$ e seção transversal de $1,5 \times 1,2 \text{ m}$ (ver Figura 4.1 (b) suas orientações); e vigas de aço com módulo de elasticidade $E = 210 \times 10^3 \text{ MPa}$, coeficiente Poisson $\nu = 0,3$ e área de $A_v = 0,08 \text{ m}^2$. A massa total do modelo é de $7,71 \times 10^7 \text{ kg}$. Um aspecto importante que pode ser observado através da Figura 4.1 (a) é que o OR e o BT atravessam 3 andares, sendo que suas posições correspondem ao pavimento mais superior em que estão localizados.

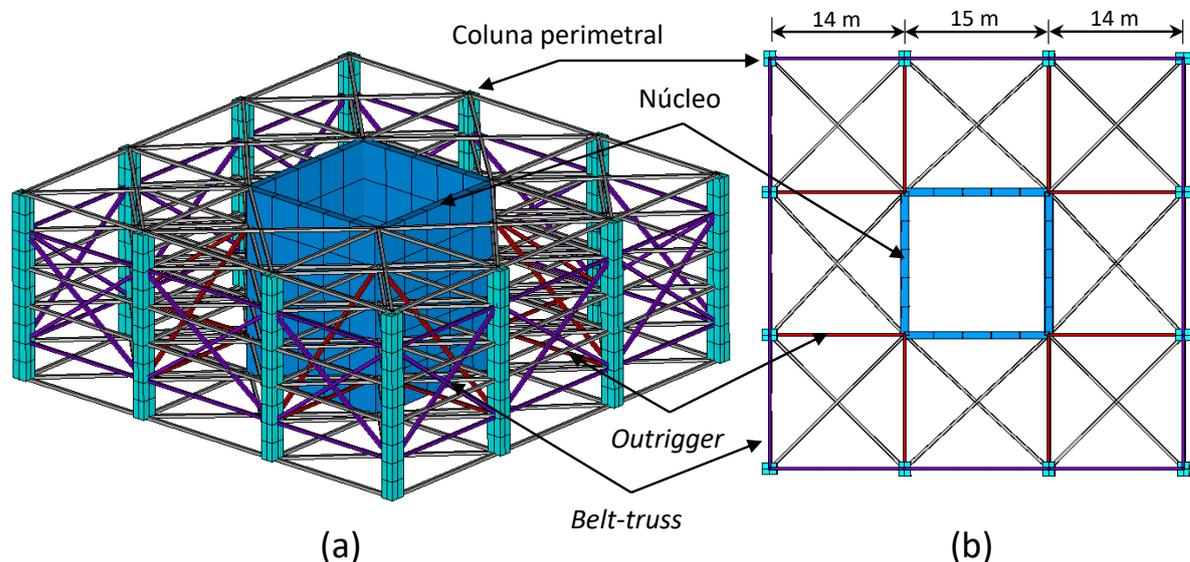


Figura 4.1 – Modelo numérico em (a) perspectiva (b) planta

No núcleo empregou-se o elemento finito de casca (SHELL181), já nos ORs, BTs e nas vigas do pavimento, elemento de treliça (LINK180), e nas colunas foi empregado o elemento de pórtico espacial (BEAM188). A quantidade de elementos é definida através de um estudo de malha, que está apresentado na seção 4.2. A base do edifício é totalmente engastada. Vale ressaltar que

os elementos de treliça introduzidos no pavimento têm a função de simular o diafragma rígido promovido pelas lajes dos pavimentos, mesmo princípio adotado em outros trabalhos, como é o caso de Lee e Tovar (2014).

4.2 ESTUDO DE MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

A discretização da malha de elementos finitos empregada no modelo do edifício alto interfere diretamente no resultado dos objetivos de interesse como, por exemplo, o máximo deslocamento lateral e o momento na base do núcleo. Portanto, para se obter valores confiáveis e com tempo de processamento razoável, realizou-se um estudo de convergência da malha de elementos finitos. No modelo existem apenas dois elementos que podem ser refinados: (a) as colunas externas e (b) o núcleo rígido. Em relação às colunas externas, verificou-se que ao melhorar o refinamento do elemento, os resultados dos objetivos quase que não se modificaram e, por este motivo, optou-se por utilizar dois elementos BEAM188 por pavimento com função quadrática. Já em relação ao elemento de casca (SHELL181) empregado no núcleo rígido, verificou-se que ao refina-lo, os resultados de deslocamento e momento foram modificados. Portanto, foram utilizadas sete discretizações de malhas para o núcleo, conforme ilustrado na Figura 4.2.

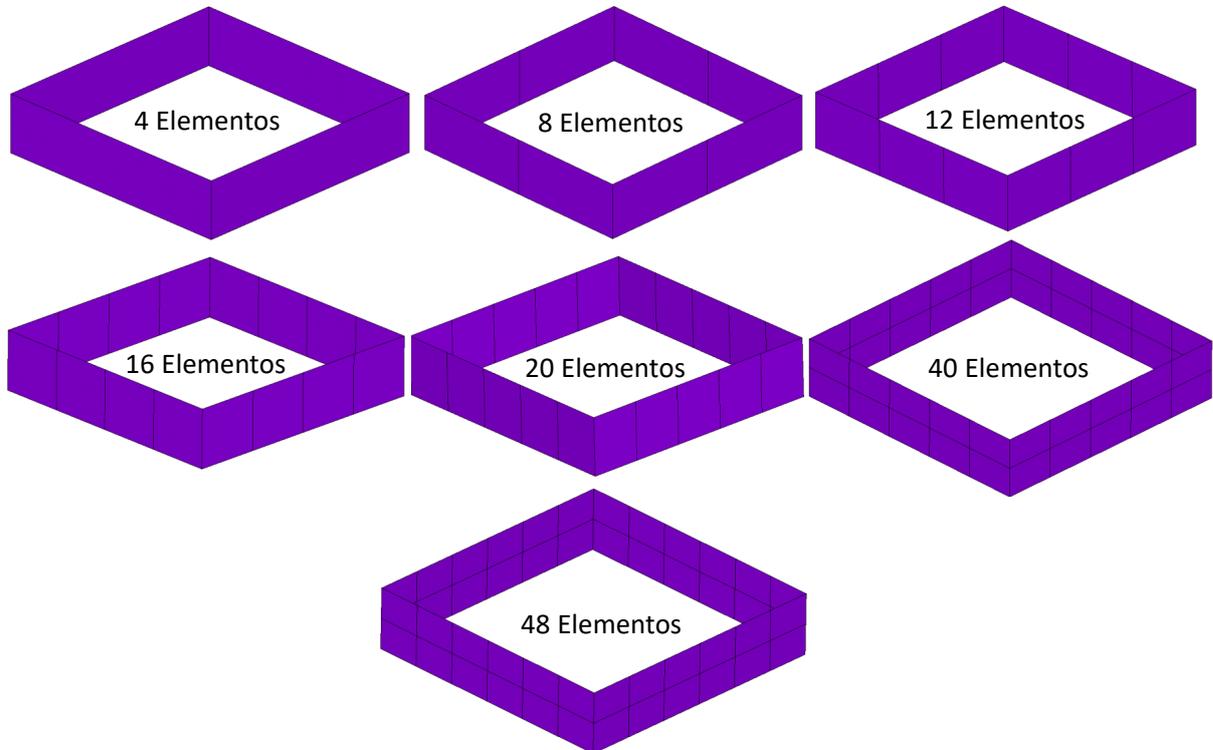


Figura 4.2 – Diferentes discretizações de malha para o núcleo

Nas Figuras 4.3 e 4.4 são ilustrados, respectivamente, o resultado do máximo deslocamento lateral do edifício alto e do momento na base do núcleo, ambos de acordo com a discretização

por pavimento do elemento de casca do núcleo.

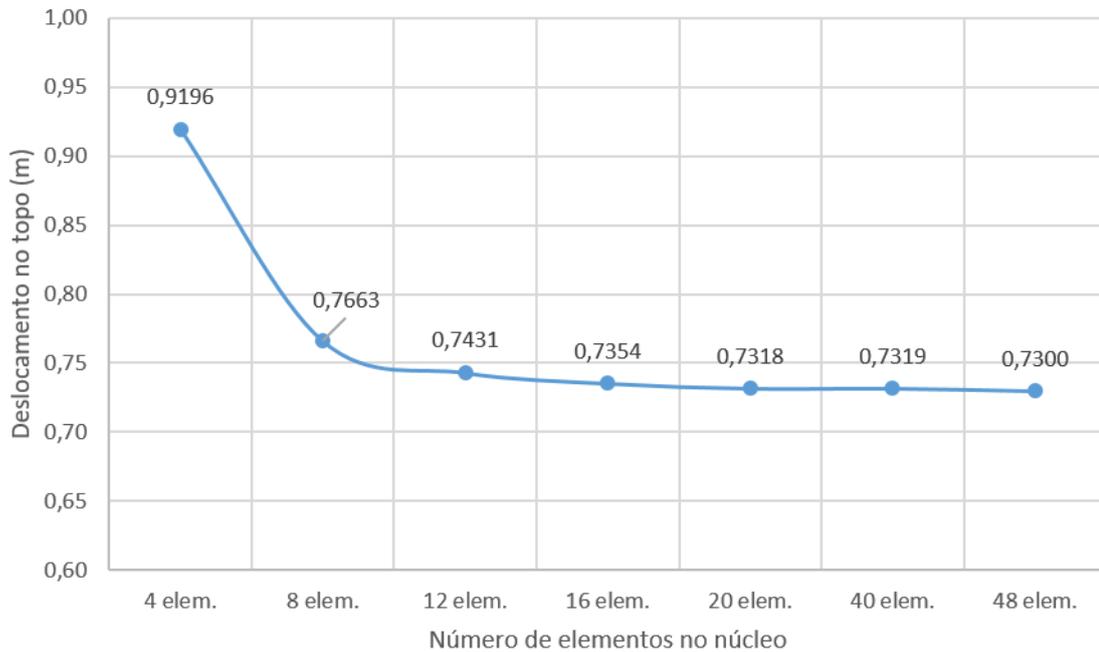


Figura 4.3 – Estudo de convergência da malha do núcleo em relação ao deslocamento no topo

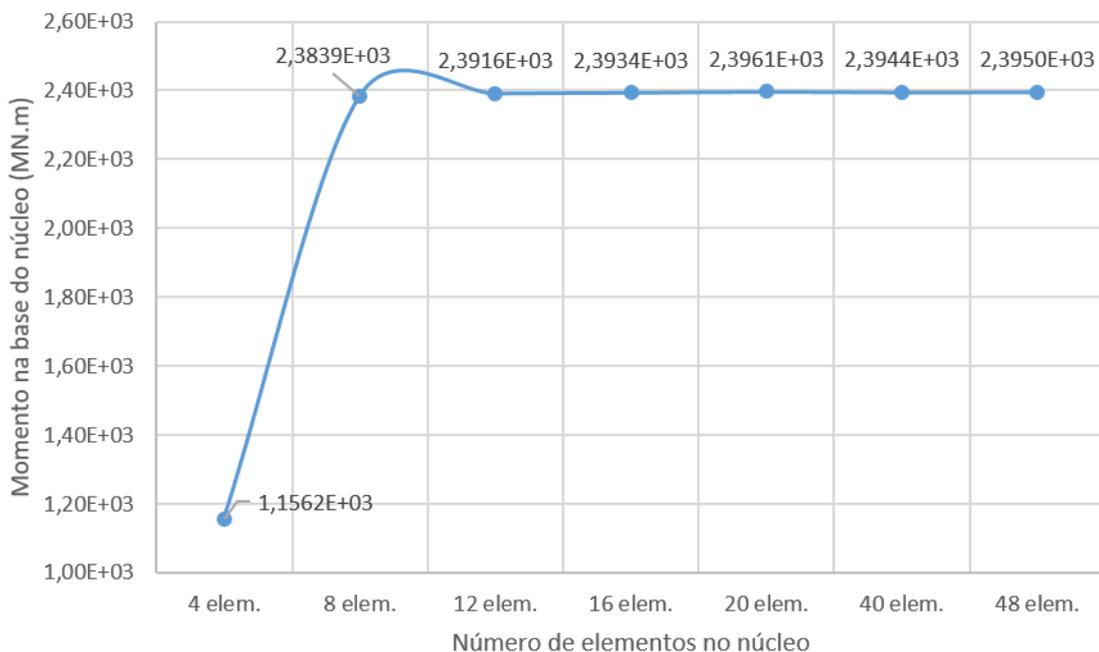


Figura 4.4 – Estudo de convergência da malha do núcleo em relação ao momento na base do núcleo

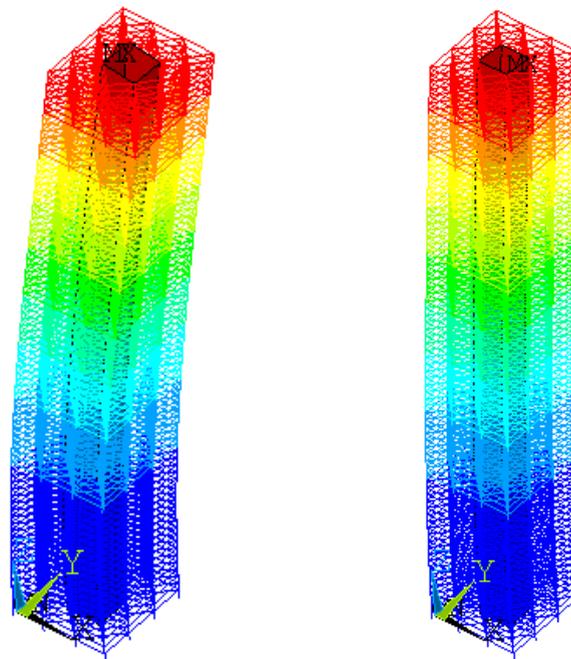
Deste modo, conclui-se que ao discretizar o núcleo em vinte elementos por pavimento o modelo apresenta resultados adequados do ponto de vista estrutural e também viável em relação ao tempo de processamento que, em média, é de dez segundos por chamada para computador com um processador i7 de 2ª geração (3,4 GHz) e 12 GB de memória RAM.

4.3 ANÁLISE DO EDIFÍCIO ALTO SEM *OUTRIGGER/BELT-TRUSS*

Nesta seção são apresentadas um conjunto de análises feito sobre o modelo numérico do edifício sem empregar o sistema *outrigger*.

4.3.1 Análise modal

A análise modal foi utilizada para determinar os modos de vibração e as frequências naturais da estrutura. Através do método de iteração por subespaços (*subspace* no ANSYS) se extraiu os dez primeiros modos de vibração ou aqueles que se encaixavam num intervalo de 0 – 2 Hz. Nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 são ilustrados os seis primeiros modos de vibração da estrutura.



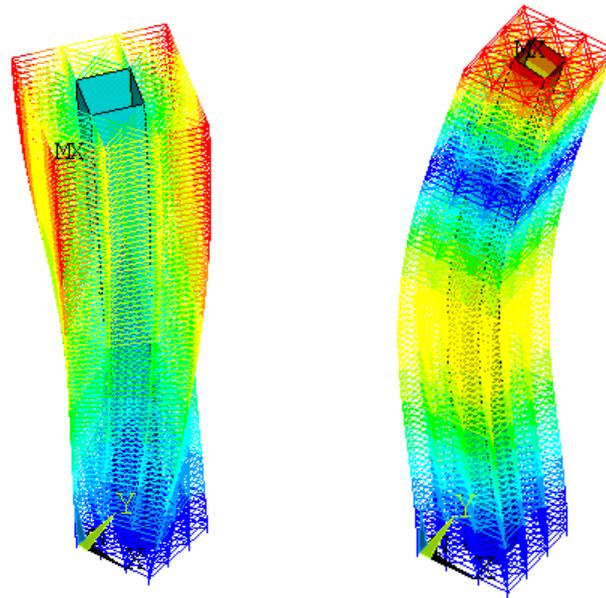
1º Modo de vibração:

$$f_1 = 0,11 \text{ Hz}$$

2º Modo de vibração:

$$f_2 = 0,11 \text{ Hz}$$

Figura 4.5 – 1º e 2º modo de vibração do edifício alto sem ORs-BTs



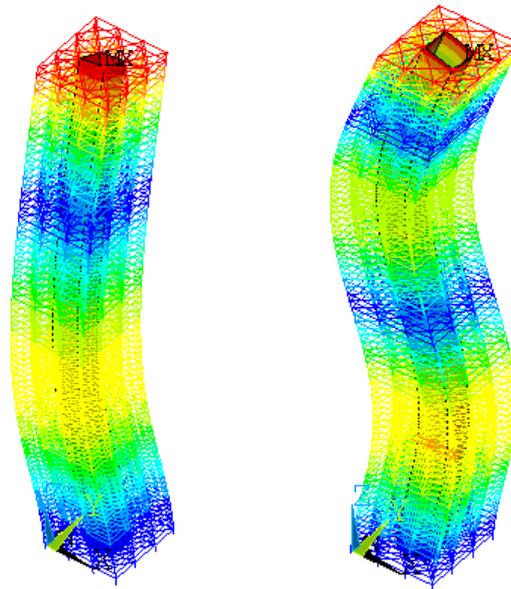
3º Modo de vibração:

$$f_3 = 0,64 \text{ Hz}$$

4º Modo de vibração:

$$f_4 = 0,68 \text{ Hz}$$

Figura 4.6 – 3º e 4º modo de vibração do edifício alto sem ORs-BTs



5º Modo de vibração:

$$f_5 = 0,68 \text{ Hz}$$

6º Modo de vibração:

$$f_6 = 1,81 \text{ Hz}$$

Figura 4.7 – 5º e 6º modo de vibração do edifício alto sem ORs-BTs

Como pode-se observar na Figura 4.5, para os dois primeiros modos predominam-se a flexão, com valores de frequências idênticas e direções perpendiculares entre si, tendo em vista que a estrutura é simétrica. Na Figura 4.6 percebe-se que o 3º modo é de torção e o 4º apresenta

características de flexão com um nodo. E, por fim, na Figura 4.7 verifica-se que o 5° modo é similar ao 4°, e o 6° modo apresenta uma flexão com dois nodos.

Se for comparada a frequência fundamental do edifício com a frequência da equação aproximada proposta por Ellis (1980), $f = 46/H$ sendo que H é a altura total da estrutura, chega-se a resultados próximos. A frequência fundamental obtida através da análise modal é de $f = 0,11 \text{ Hz}$ e pela equação aproximada é de $f = 0,16 \text{ Hz}$, o que corresponde a uma diferença relativa de 31%.

4.3.2 Análise estática

Com o objetivo de obter o máximo deslocamento lateral e o momento na base do núcleo da estrutura quando submetida ao carregamento lateral de vento aplicado de acordo com a seção 3.3, realiza-se uma análise estática. Adicionalmente, determina-se a máxima aceleração.

4.3.2.1 Máximo deslocamento lateral

Na Figura 4.8 são ilustrados os deslocamentos laterais do modelo do edifício alto ao longo da altura.

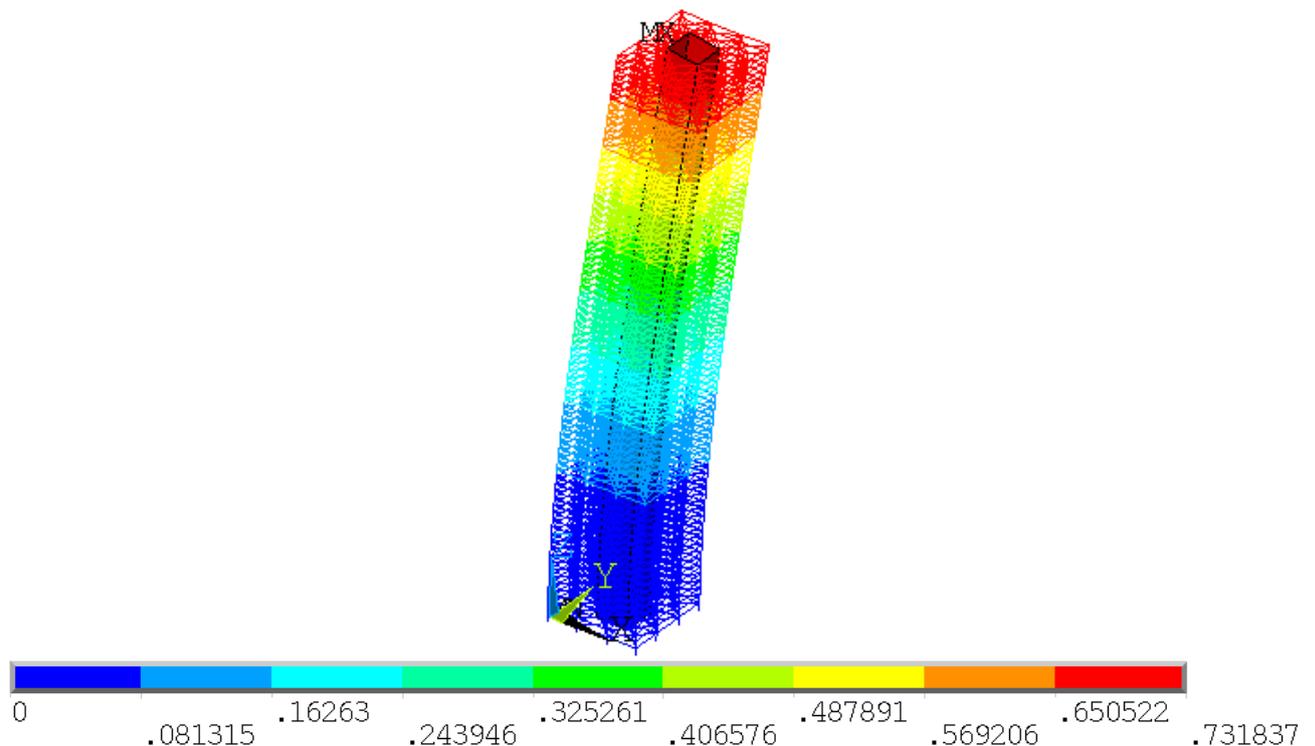


Figura 4.8 – Máximo deslocamento lateral para o modelo sem ORs-BTs (m)

Observando a Figura 4.8, verifica-se que o maior deslocamento lateral é no topo e possui valor de $0,7318 \text{ m}$. Resultado que se comparado com o limite de deslocamento global apresentado

na subseção 2.1.2.1, $H/500 = 0,56 m$, é superior em 30,7% e, portanto, deve ser controlado através de uma solução estrutural.

4.3.2.2 Momento na base do núcleo

O momento na base do núcleo, conforme já mencionado, é calculado através da resultante dos binários e momentos em torno dos eixos x e y , de acordo com

$$M_{nucleo} = \sqrt{(\sum M_x + \sum F_z d_y)^2 + (\sum M_y + \sum F_z d_x)^2} \quad (4.1)$$

em que M_x e M_y são, respectivamente, os momentos em torno de x e y , d_x e d_y são, respectivamente, as distâncias variáveis em x e y da força pontual, F_z , até o seu eixo.

Na Figura 4.9 é possível verificar a direção de todas as reações do modelo do edifício alto sem ORs e a partir delas calcular a resultante do momento fletor em relação ao ponto O , o qual é igual a $M_{nucleo} = 2,3944 \times 10^3 MN.m$, sendo mais de 99% correspondente a parcela do somatório de $F_z d_x$.

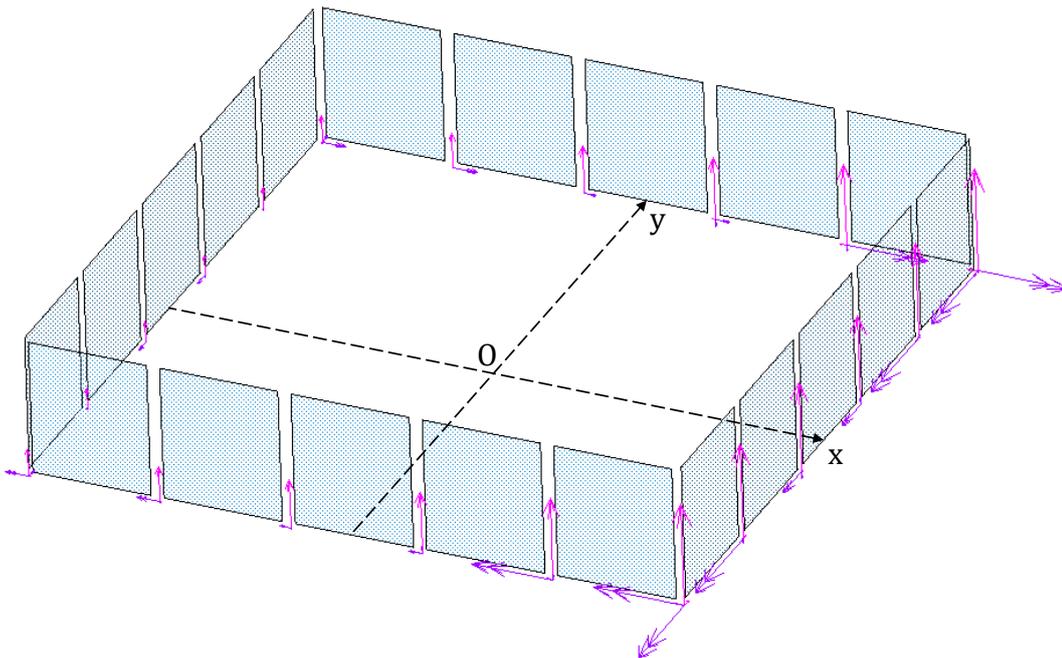


Figura 4.9 – Reações do edifício alto submetido ao carregamento lateral de vento

4.3.2.3 Máxima aceleração

A máxima aceleração, de acordo a Equação 3.8, ocorre no pavimento com o maior deslocamento lateral. Portanto, sabendo que o máximo deslocamento lateral para o primeiro modo de vibração devido à parcela flutuante vale 0,2244 m, tem-se que

$$a = 4\pi^2 (0,1134)^2 (0,2244) = 0,114 m/s^2. \quad (4.2)$$

Se comparado com o critério de conforto humano presente na subseção 2.1.2.1 como, por exemplo, aquele para edifícios residenciais de 1,5 a 2% da aceleração da gravidade o que corresponde a $0,147 \text{ m/s}^2$, a aceleração obtida é inferior e, portanto, está dentro deste limite.

4.4 ANÁLISE DO EDIFÍCIO ALTO COM *OUTRIGGER/BELT-TRUSS*

Nesta seção são apresentadas as análises do modelo numérico empregando-se o sistema *outrigger*. Para avaliar o desempenho da estrutura verifica-se o resultado dos objetivos/critérios à medida que são modificados parâmetros de interesse. Em todos os casos, deseja-se minimizar o máximo deslocamento lateral e o momento na base do núcleo – e, com relação aos critérios, minimizar a máxima aceleração e maximizar as frequências naturais.

4.4.1 Análise da rigidez do *outrigger*

Ao aumentar a rigidez do OR treçado espera-se que os objetivos analisados sigam uma trajetória inversamente proporcional, exceto no caso da frequência fundamental, que deve seguir em uma crescente. Para verificar a influência da área da seção transversal do OR em relação aos objetivos, variou-se de $0 - 0,14 \text{ m}^2$ das áreas das barras horizontais que compõem o OR. Na Figura 4.10 estão dispostos os melhores resultados encontrados para cada valor de área adotado, ou seja, o OR encontra-se nos diferentes pavimentos ótimos para cada caso de área.

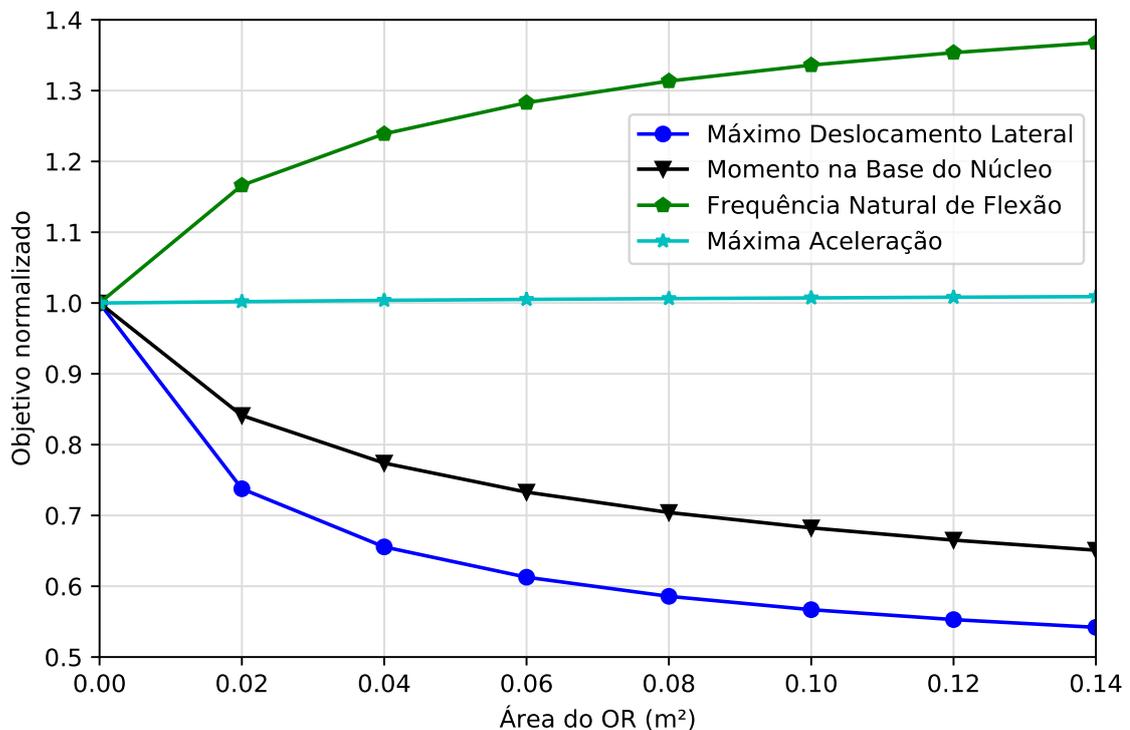


Figura 4.10 – Influência da área do OR em relação aos objetivos/critérios analisados

Da Figura 4.10 pode-se concluir que: (a) a influência da rigidez do OR na taxa de variação dos objetivos analisados, em valores absolutos, segue uma trajetória decrescente; (b) existe uma relação qualitativamente constante entre o MDL e MBN; (c) após exceder valor de área do OR de $0,06 \text{ m}^2$ os objetivos pouco se modificam, sendo a maior variação de aproximadamente 3%, o que possivelmente não é justificável em termos econômicos; e (d) a máxima aceleração apresenta um comportamento indiferente com o valor de área do OR.

Adotando-se, portanto, uma área de $0,06 \text{ m}^2$ para as barras horizontais do OR obtêm-se reduções expressivas de 39% para o MDL e 27% para o MBN. Já para a frequência natural de flexão, há um aumento de 28%.

Por outro lado, através das Figuras 4.11 a 4.14 é possível destacar que a posição ótima (dada pelo pavimento com menor valor da função objetivo) do OR ao longo da altura do modelo é variável conforme o objetivo analisado e também pela área do OR adotada. Em geral, o máximo deslocamento lateral, a frequência natural e a máxima aceleração possuem pavimentos ótimos próximos, sendo localizados na metade superior do edifício. Já em relação ao momento na base do núcleo, os pavimentos ótimos sempre se localizam na metade inferior. Cabe ressaltar que ao aumentar a rigidez do OR o pavimento ótimo abaixa de posição em todos os casos, ou seja, aproxima-se mais da base. Outro ponto importante observado é o aumento da capacidade do OR em redistribuir os esforços do núcleo para as colunas do perímetro a medida que a rigidez do OR aumenta, fato que pode ser constatado pelo incremento da curvatura.

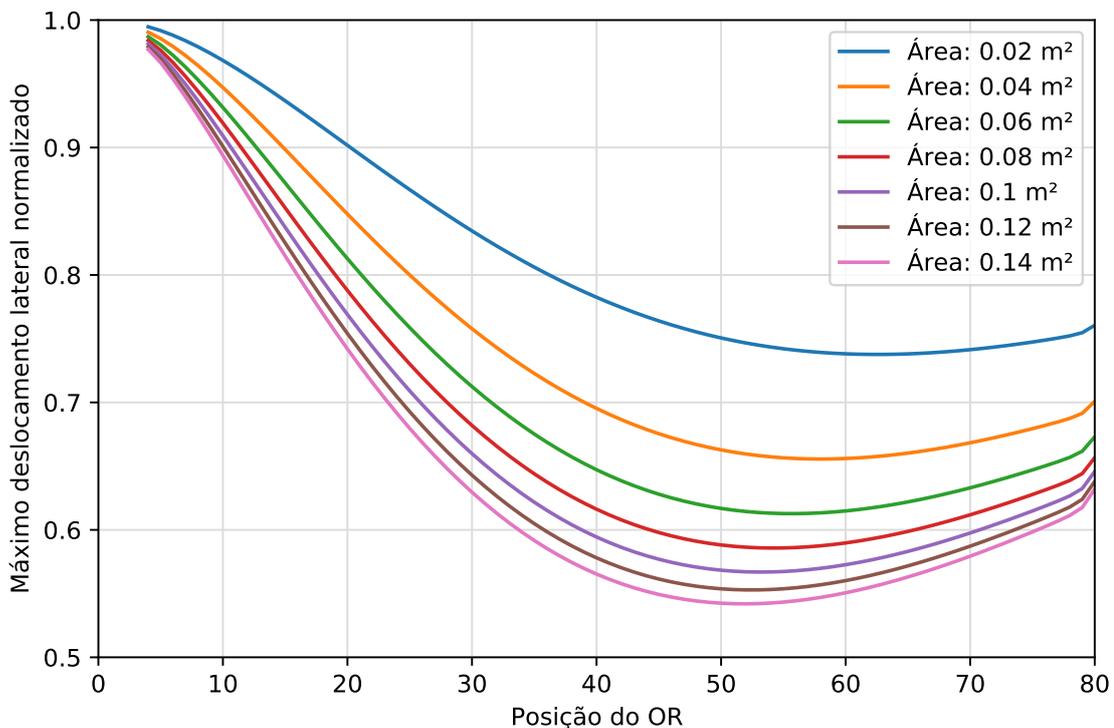


Figura 4.11 – Influência da área do OR em relação ao pavimento ótimo (máximo deslocamento lateral)

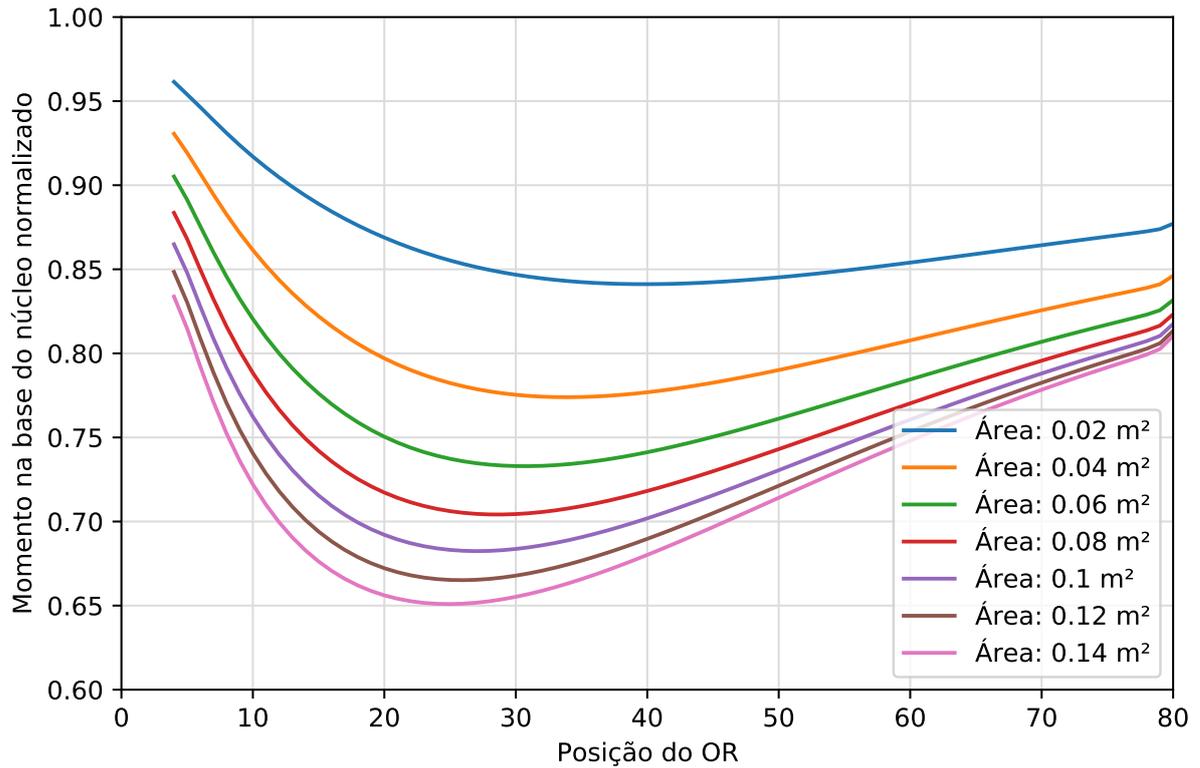


Figura 4.12 – Influência da área do OR em relação ao pavimento ótimo (momento na base do núcleo)

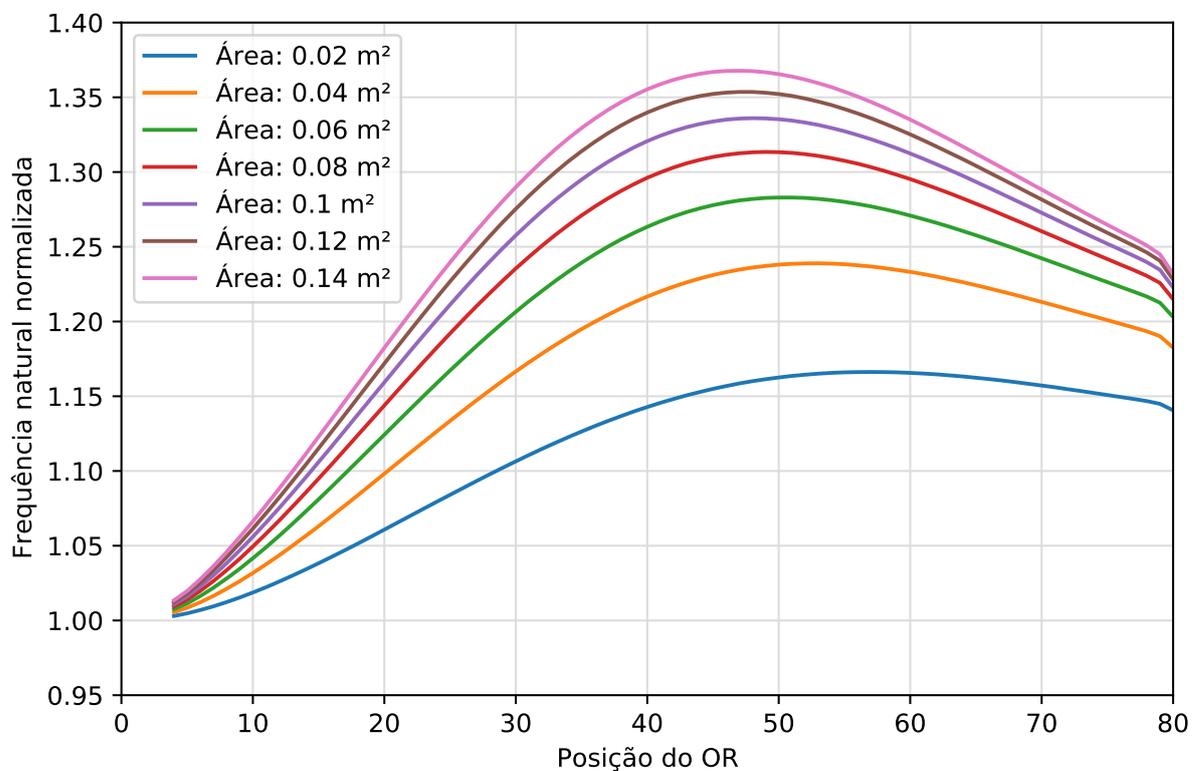


Figura 4.13 – Influência da área do OR em relação ao pavimento ótimo (frequência natural de flexão)

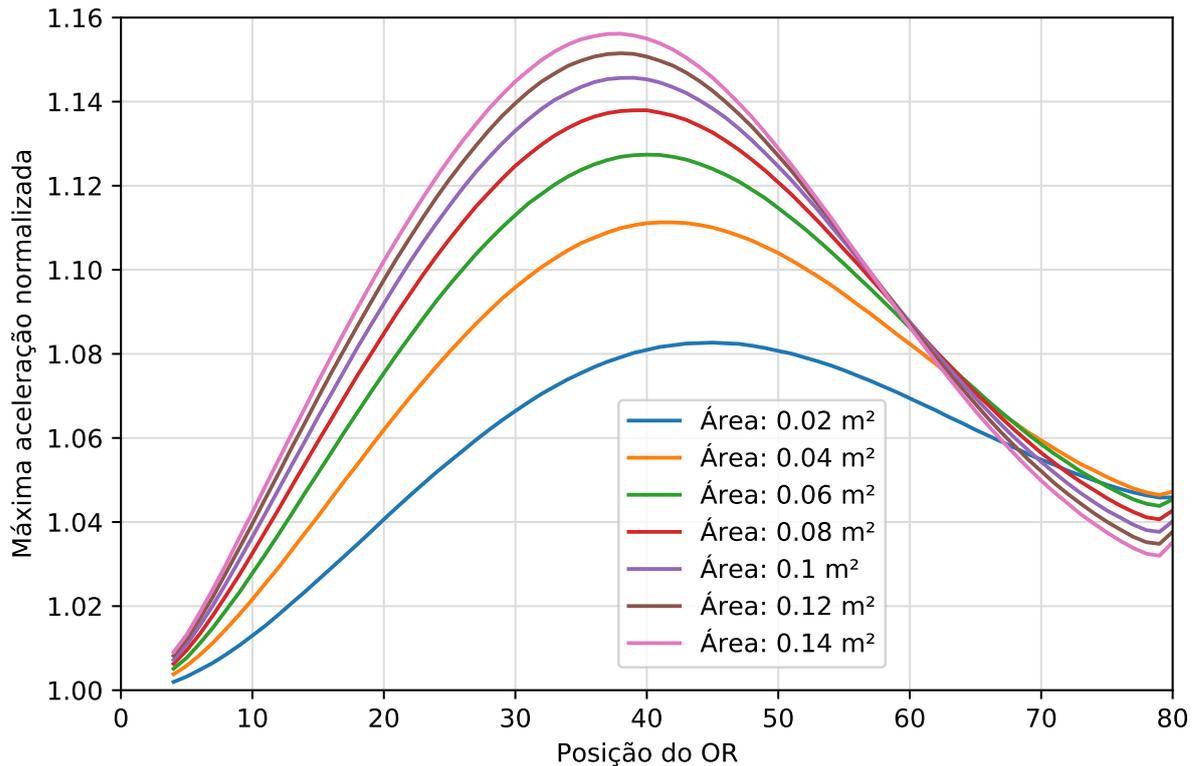


Figura 4.14 – Influência da área do OR em relação ao pavimento ótimo (máxima aceleração)

Na Figura 4.15 é ilustrado a posição ótima do OR conforme o objetivo analisado quando existe apenas um OR ao longo da altura com área de $0,06 \text{ m}^2$ para as barras horizontais do OR.

4.4.2 Análise da rigidez do *belt-truss*

Implementar um cinturão em torno do perímetro do pavimento onde está localizado o OR é uma opção para aumentar ainda mais a rigidez do edifício alto e aproveitar todo o espaço disponível dos pavimentos mecânicos. Ao unir as colunas externas através do BT, não só aquelas colunas que estão diretamente ligadas ao OR irão auxiliar a combater as intensas cargas laterais, mas também todas as demais. Portanto, ao adicionar este elemento ao sistema lateral, todos os objetivos analisados devem ser modificados, de modo a melhorar o comportamento do edifício. A rigidez torcional do edifício, que não havia sido verificada na análise anterior somente com ORs, a princípio, também deve ser beneficiada.

Assim como no caso da subseção 4.4.1, em primeiro momento o estudo é conduzido modificando-se a seção transversal do BT de $0 - 0,14 \text{ m}^2$, de modo a verificar sua interferência na estrutura. A relação de área das diagonais para os banzos é de $\sqrt{2}$. Na Figura 4.16 são apresentados os resultados ótimos obtidos para cada valor de área do BT e objetivo analisado, quando existe apenas um OR.

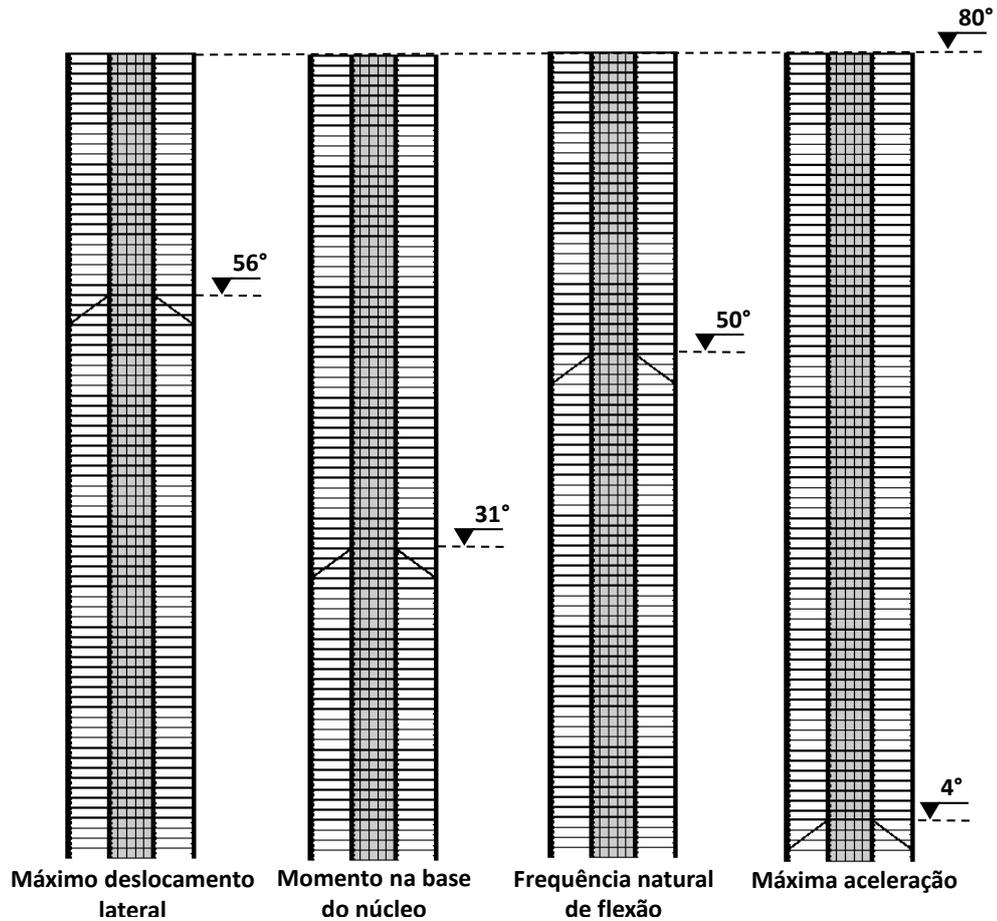


Figura 4.15 – Posição ótima do OR em relação aos objetivos analisados (Área das barras horizontais do OR: $A_{OR} = 0,06 \text{ m}^2$)

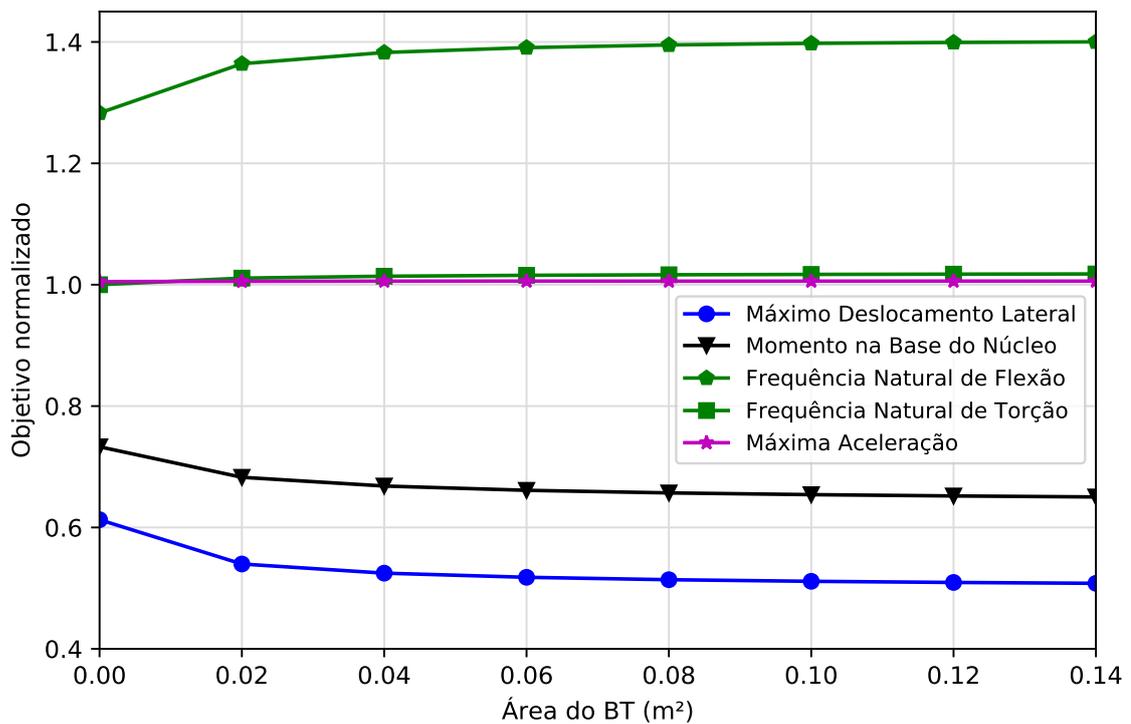


Figura 4.16 – Influência da área do BT em relação aos objetivos/critérios analisados

A Figura 4.16 ilustra que ao introduzir o BT juntamente com OR, os objetivos analisados são favorecidos de forma suave, com exceção da frequência natural de torção e máxima aceleração, às quais se mantém praticamente constante. No entanto, nota-se que a interferência da rigidez do BT é quase que imperceptível em relação a qualquer um dos objetivos. Outro ponto importante que deve ser destacado é a influência nula do BT sobre a rigidez torcional, parâmetro que de acordo com literatura deveria ser melhorado. Tal fato pode ser justificado pelo sistema de pisos adotado para reproduzir o diafragma rígido das lajes, já que a conexão entre o núcleo e as colunas externas através dos elementos de treliça não permitem a deformação de torção relativa entre a porção externa e interna.

Em virtude da adição de área ao BT não interferir de forma razoável o comportamento do edifício e por conveniência, opta-se por utilizar a mesma relação de área dos ORs para o BTs, $A_{BT} = 0,06 \text{ m}^2$.

Das Figuras 4.17 a 4.20 são ilustradas para cada objetivo a influência do OR-BT em relação a sua posição ao longo da altura bem como da rigidez do BT.

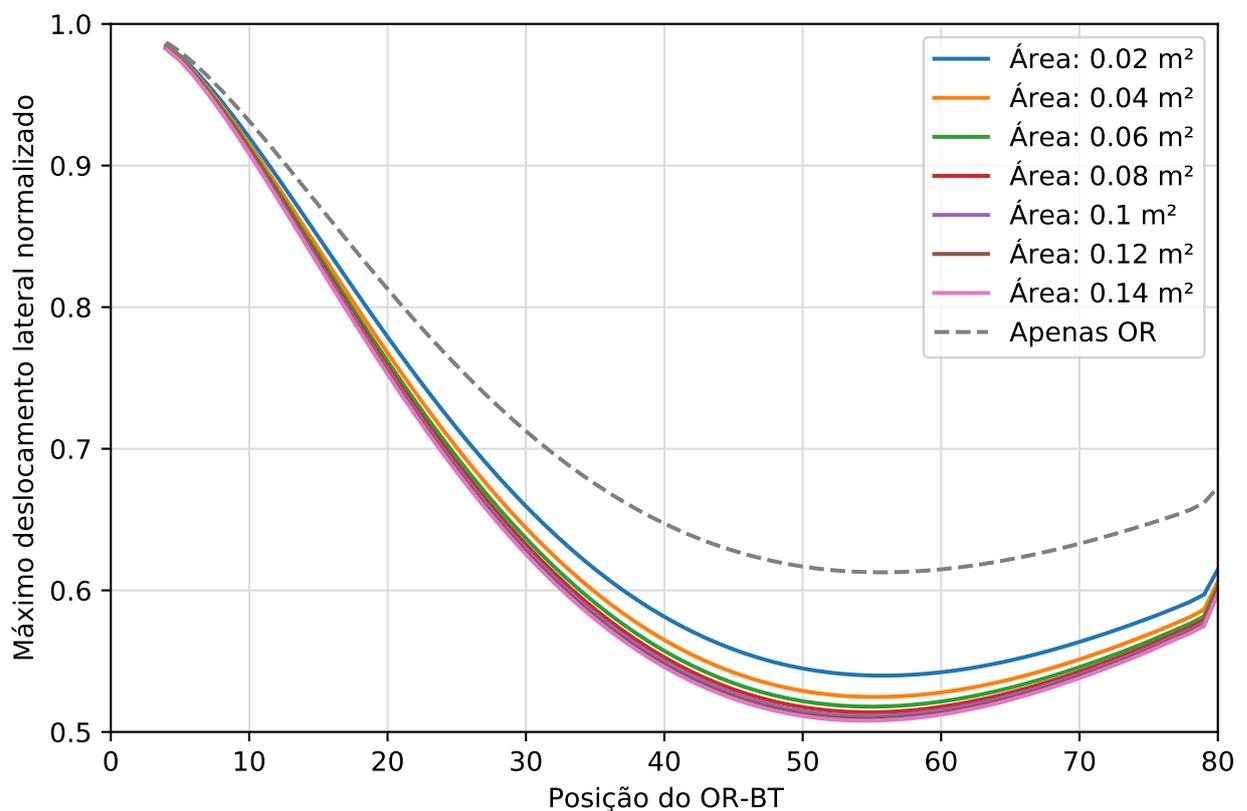


Figura 4.17 – Influência da área do BT em relação ao pavimento ótimo (máximo deslocamento lateral)

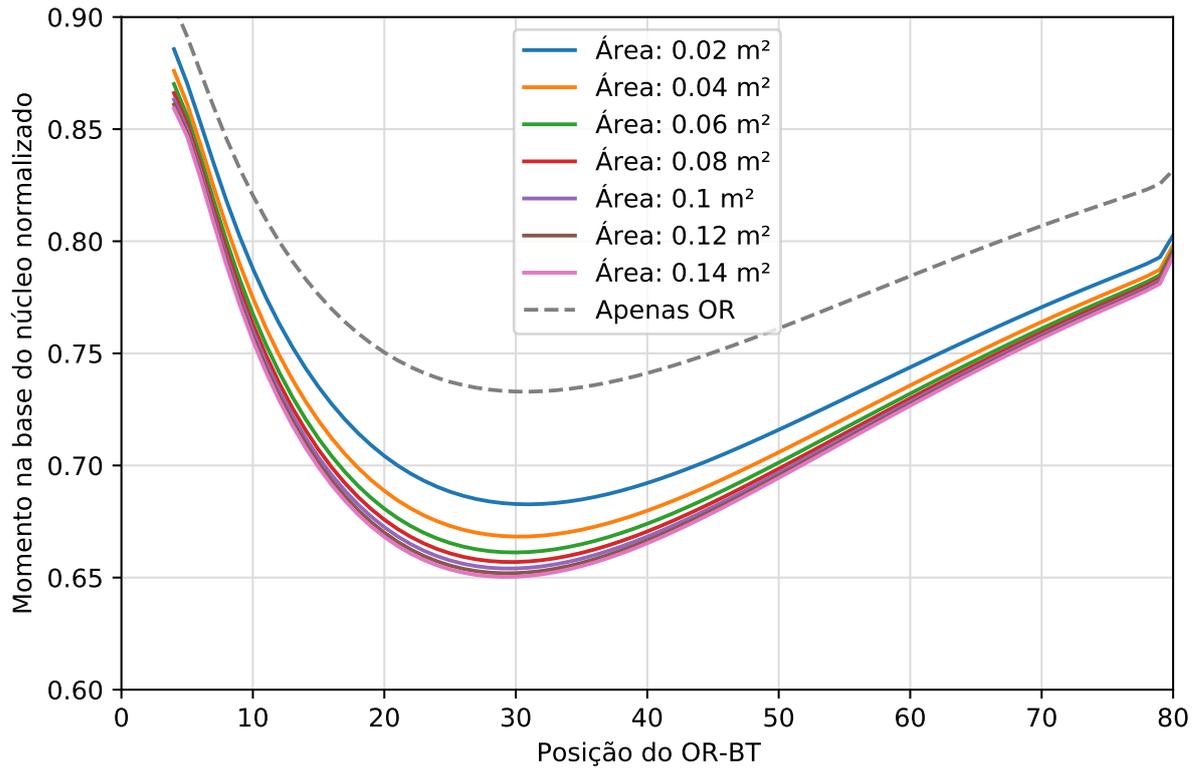


Figura 4.18 – Influência da área do BT em relação ao pavimento ótimo (momento na base do núcleo)

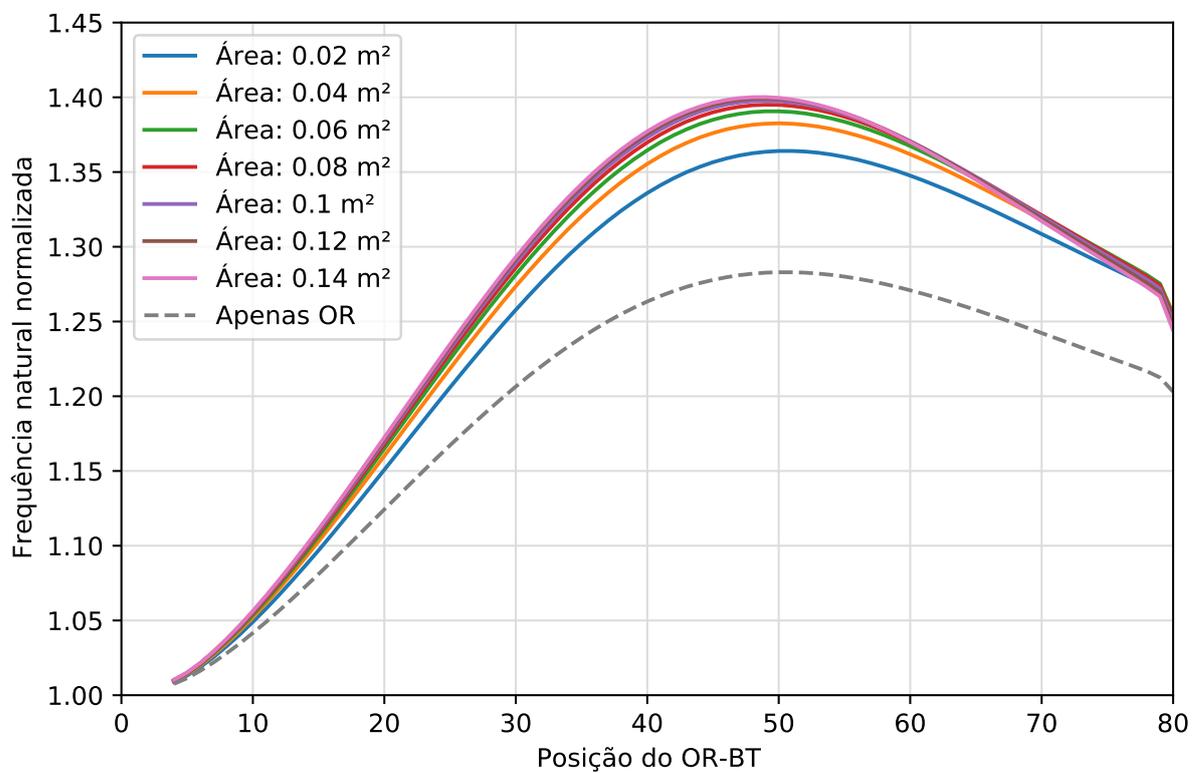


Figura 4.19 – Influência da área do BT em relação ao pavimento ótimo (frequência natural de flexão)

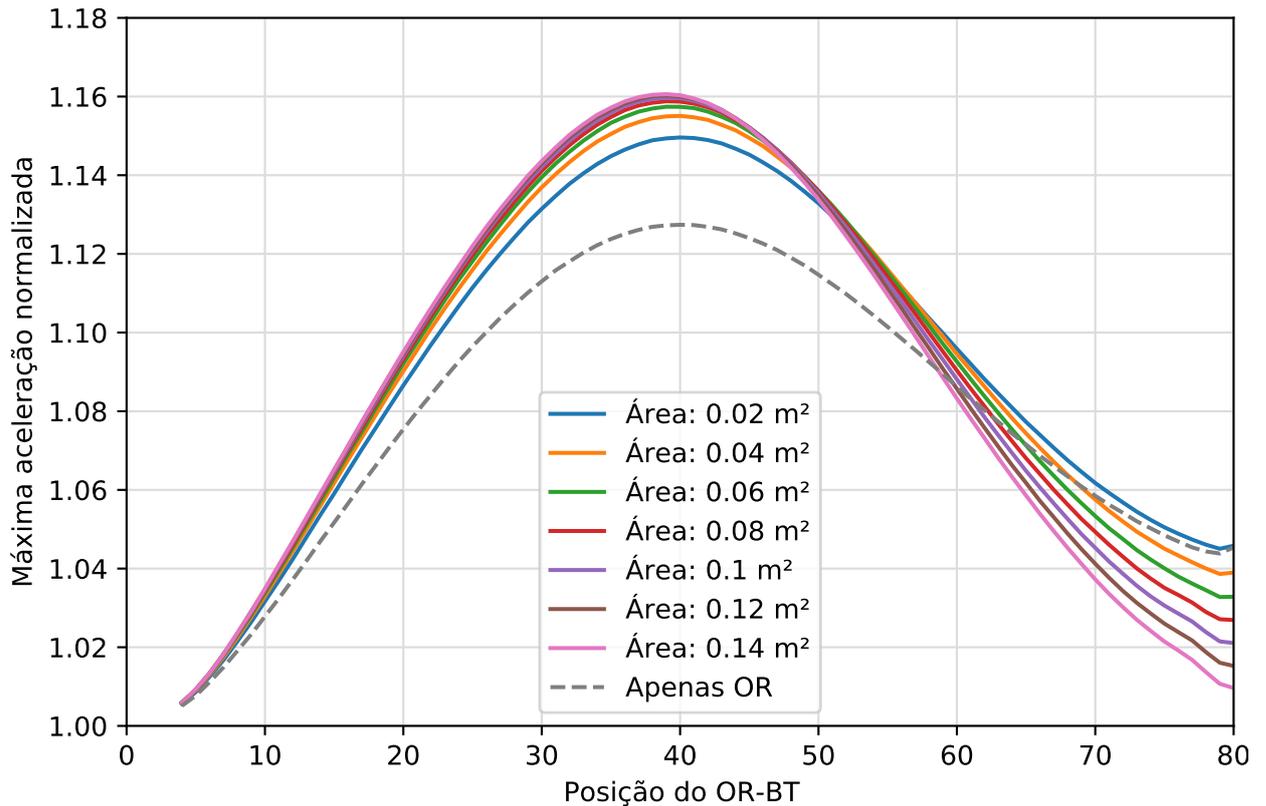


Figura 4.20 – Influência da área do BT em relação ao pavimento ótimo (máxima aceleração)

Observando-se as Figuras 4.17 a 4.20 conclui-se que a área do BT não interfere de maneira significativa na posição ótima do OR-BT. Efetivamente, o que ocorre é simplesmente uma translação da curva quando existe apenas o OR.

4.4.3 Análise da relação de rigidez colunas-núcleo

Levando em consideração que tanto o núcleo quanto as colunas externas fazem parte do sistema lateral OR-BT e funcionam em conjunto, possivelmente a relação de rigidez entre estes elementos deve interferir nos objetivos analisados. Para verificar se esta relação de fato é importante para o estudo, calculou-se a resposta do edifício para diversas relações de rigidezes, sendo a equação para um caso único dada por

$$R_{rig} = \frac{I_{cols}}{I_{nuc}} \quad (4.3)$$

em que I_{nuc} e I_{cols} são, respectivamente, os momentos de inércia de área em relação ao centro geométrico do modelo para o núcleo e para o conjunto de colunas. Outro ponto importante é que para não priorizar nenhum dos dois elementos, utilizou-se o modelo padrão como referência, ou seja, o valor de área do núcleo ou das colunas é modificado numa proporção tal que o somatório das áreas continue sendo sempre o mesmo, independente da relação de rigidez. Adicionalmente, para facilitar o entendimento, a relação de rigidez foi normalizada a partir do modelo padrão,

que possui $R_{rig} = 7,84$. Na Figura 4.21 são apresentados os resultados ótimos obtidos para cada valor de relação de rigidez e objetivo analisado, quando existe apenas 1 OR-BT.

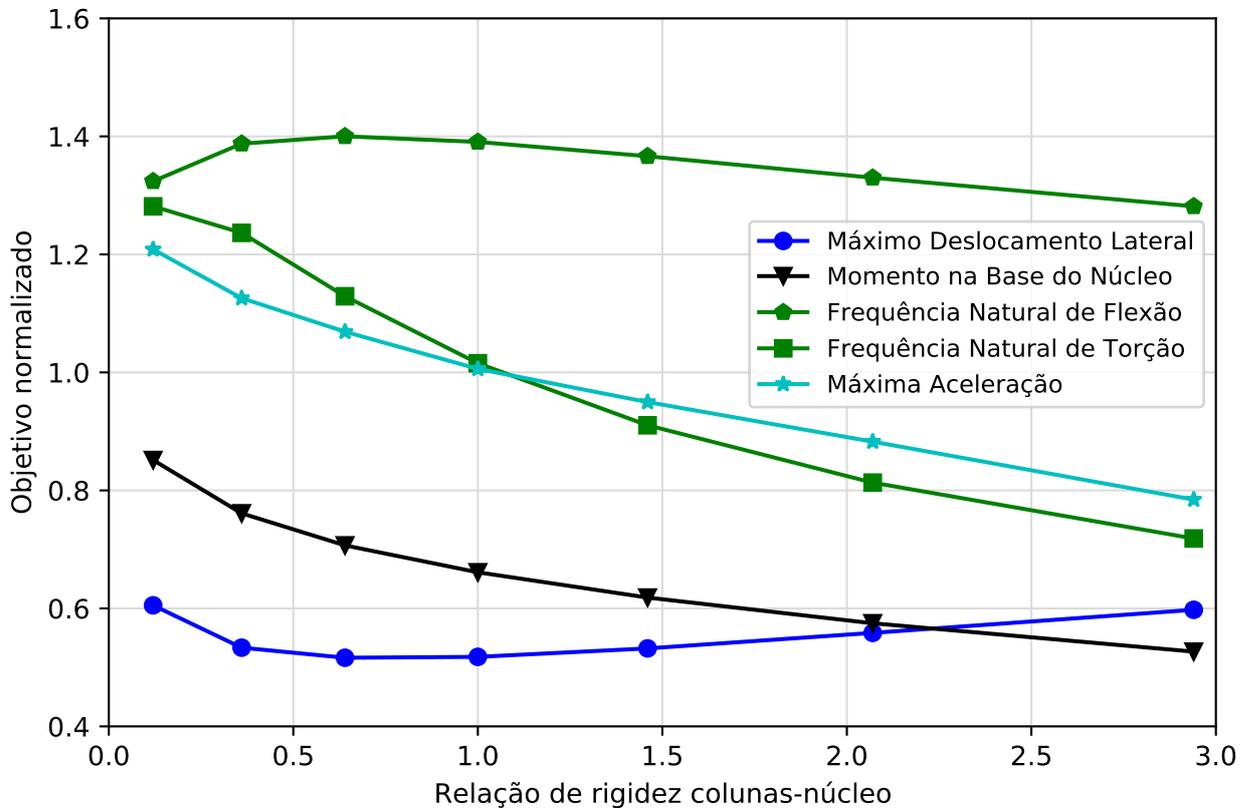


Figura 4.21 – Influência da relação de rigidez colunas-núcleo sobre os objetivos/critérios analisados

Com base na Figura 4.21 demonstra-se que a relação de rigidez interfere diretamente na resposta do modelo. A curva do máximo deslocamento lateral e da frequência natural de flexão evidenciam a existência de uma relação de rigidez ótima ($0,36 < R_{rig} < 1$), a qual possui área do núcleo maior e, conseqüentemente, área menor para as colunas, se comparado com o modelo de referência. A respeito do momento na base do núcleo, o menor valor é obtido ao aumentar R_{rig} , de modo que as colunas externas absorvam maior esforço axial. O mesmo comportamento ocorre para a máxima aceleração. Já para a frequência natural de torção acontece o oposto, tendo em vista que quanto maior o seu valor, melhor será a resposta do edifício.

Da Figura 4.22 a Figura 4.25 são ilustradas para cada objetivo a influência do OR-BT a respeito de sua posição ao longo da altura bem como da relação de rigidez entre as colunas e o núcleo.

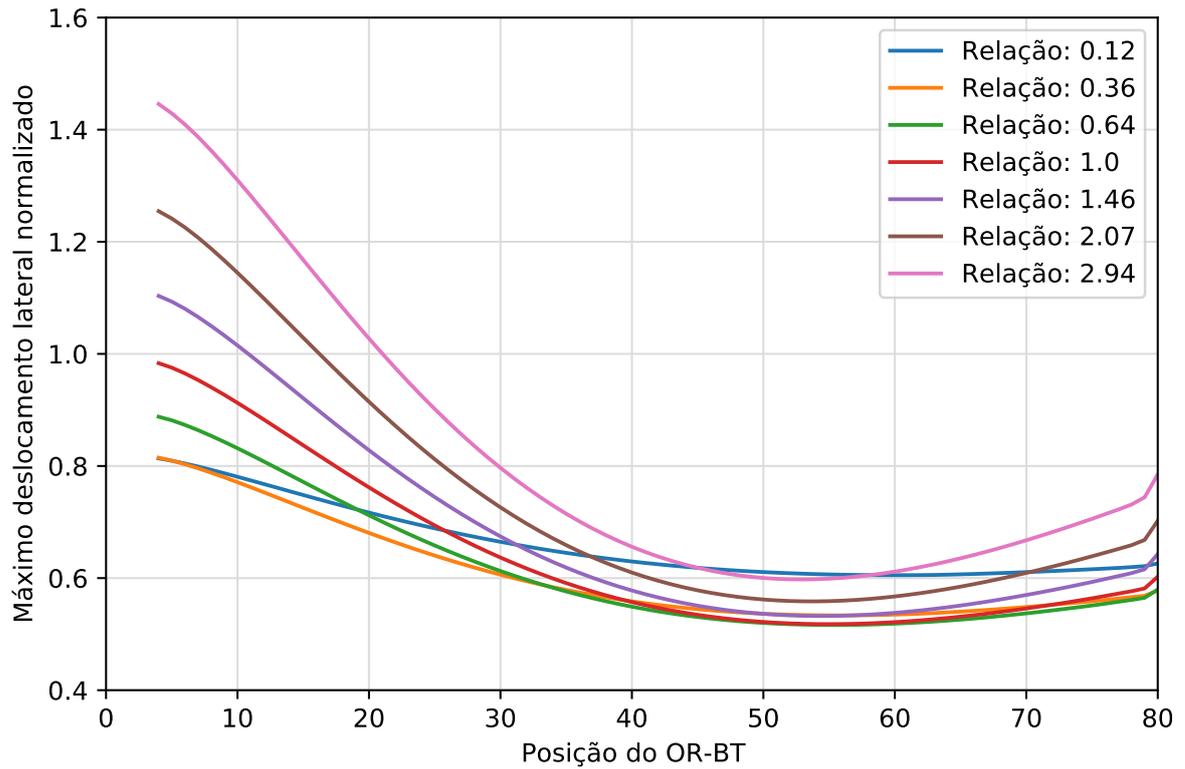


Figura 4.22 – Influência da relação de rigidez colunas-núcleo sobre o pavimento ótimo (máximo deslocamento lateral)

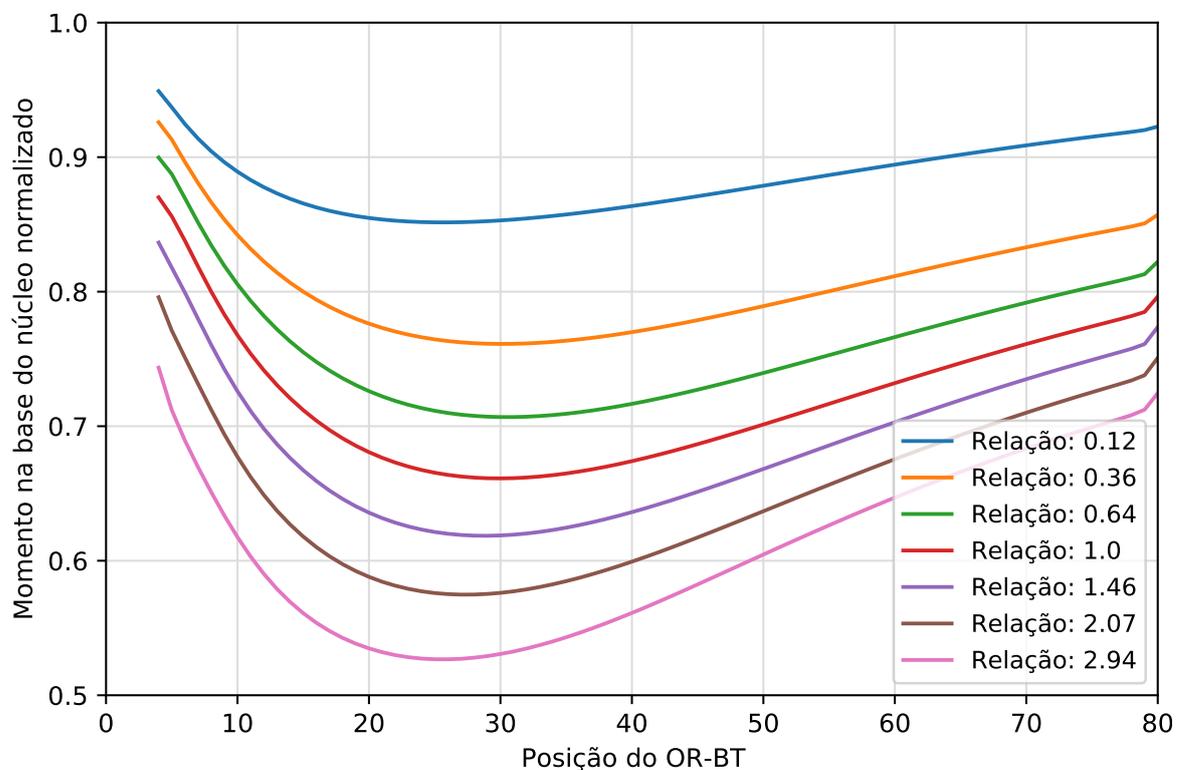


Figura 4.23 – Influência da relação de rigidez colunas-núcleo sobre o pavimento ótimo (momento na base do núcleo)

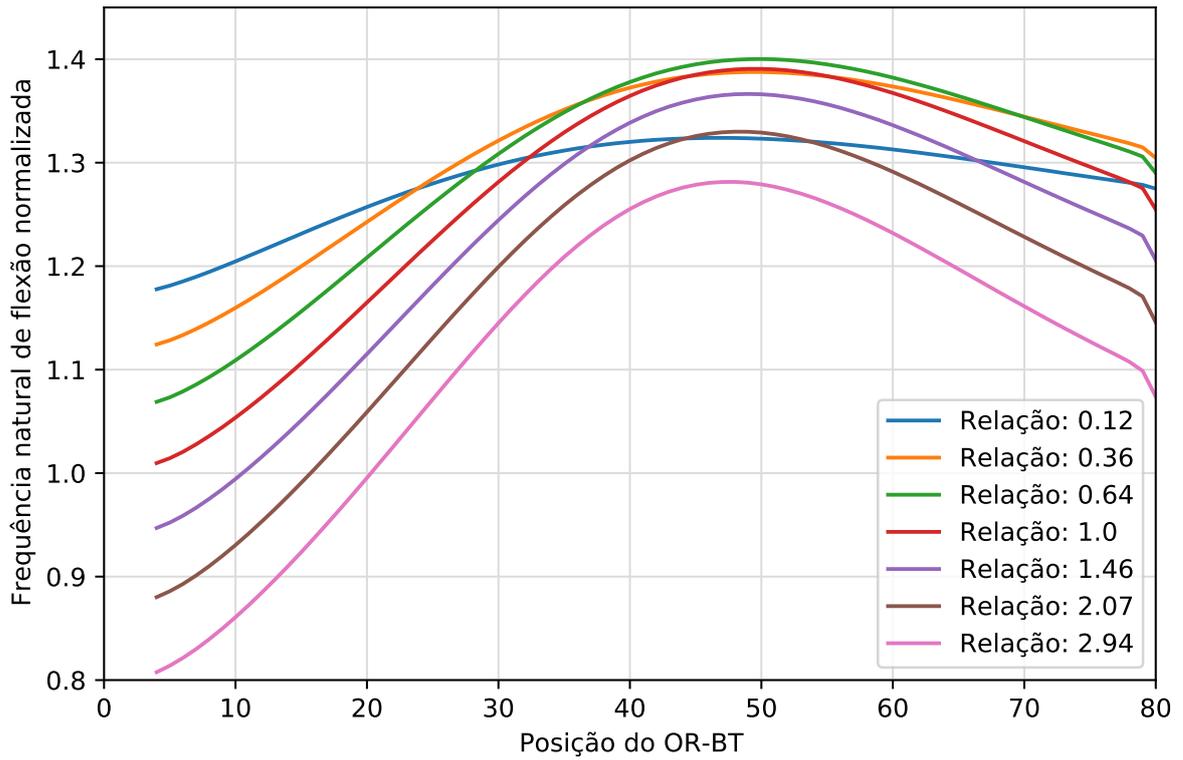


Figura 4.24 – Influência da relação de rigidez colunas-núcleo sobre o pavimento ótimo (frequência natural de flexão)

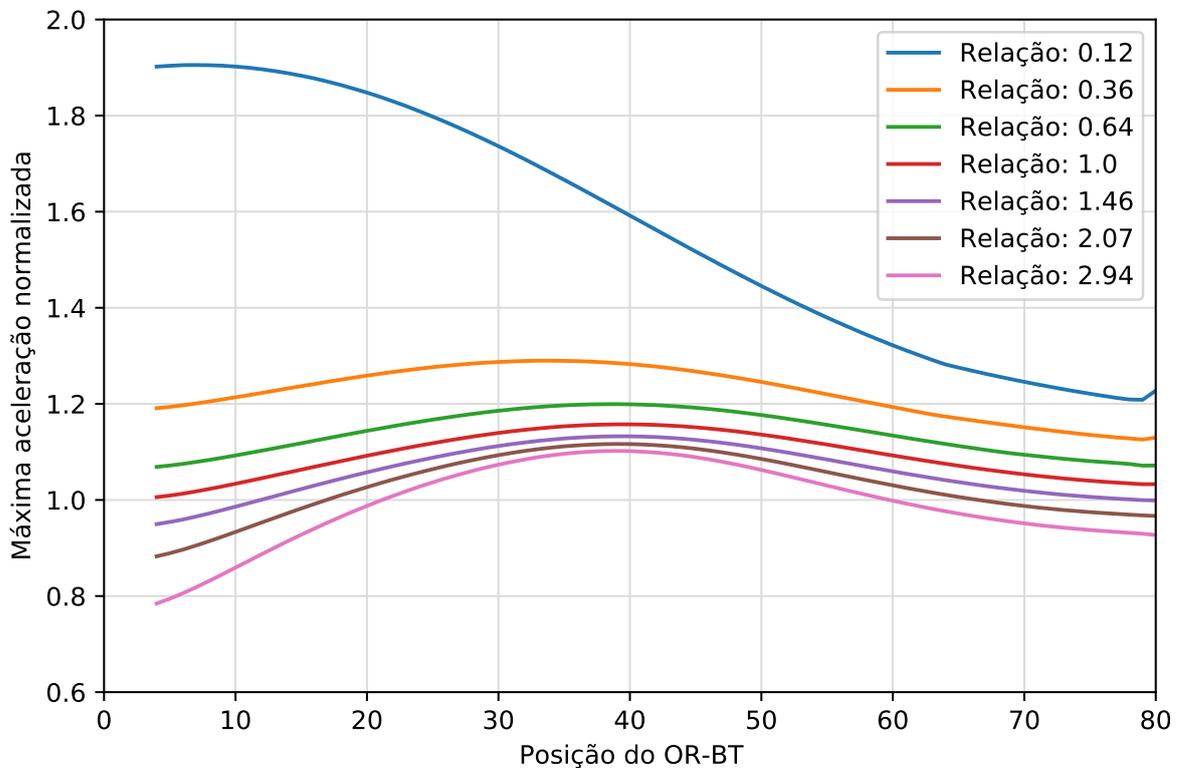


Figura 4.25 – Influência da relação de rigidez colunas-núcleo sobre o pavimento ótimo (máxima aceleração)

Analisando-se as Figuras 4.22 a 4.25, em um primeiro momento, é visível que se a relação de rigidez for baixa, a ação do OR-BT torna-se menos eficiente, tendo em vista a pequena variação dos objetivos ao mudar a posição do OR-BT. Um comportamento diferente ocorre para a máxima aceleração quando $R_{rig} = 0,12$, que do 4º pavimento até o 80º o seu valor sempre diminui. Como já destacado para o MDL e frequência natural de flexão existe uma relação ótima que, para os casos estudados, é de $R_{rig} = 0,64$. A respeito dos pavimentos ótimos, cabe destacar que as diferentes relações de rigidez não os modificam de forma expressiva, exceto para o caso do MBN.

5 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

5.1 RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO MONO-OBJETIVO

O resultado da otimização mono-objetivo é obtido através do algoritmo Nelder-Mead modificado, adotando-se os mesmos parâmetros da Tabela 3.1.

5.1.1 Máximo deslocamento lateral

As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram as posições ótimas obtidas para minimizar o máximo deslocamento lateral do modelo apresentado no Capítulo 4, juntamente com os seus respectivos resultados normalizados pelos valores sem ORs-BTs, que são: MDL de 0,7318 *m*, MBN de $2,3944 \times 10^3$ *MN.m*, frequência natural de flexão de 0,11 *Hz* e máxima aceleração de 0,114 *m/s²*. A Tabela 5.1 apresenta os resultados das otimizações com apenas ORs, já a Tabela 5.2 com ORs e BTs.

Tabela 5.1 – Resultados das otimizações mono-objetivo para o MDL (OR)

Quant. ORs	Posição ótima	MDL norm.	MBN norm.	Freq. nat. flexão norm.	Máx. acel. norm.
1	56	0,613	0,775	1,279	1,098
2	39, 62	0,515	0,686	1,398	1,13
3	32, 47, 66	0,469	0,637	1,468	1,144
4	27, 39, 52, 68	0,442	0,601	1,515	1,155
5	24, 34, 44, 56, 70	0,423	0,576	1,549	1,161
6	21, 29, 38, 47, 58, 71	0,41	0,551	1,576	1,168

Tabela 5.2 – Resultados das otimizações mono-objetivo para o MDL (OR-BT)

Quant. ORs-BTs	Posição ótima	MDL norm.	MBN norm.	Freq. nat. flexão norm.	Máx. acel. norm.
1	55	0,518	0,717	1,384	1,115
2	39, 62	0,406	0,614	1,562	1,157
3	31, 47, 66	0,355	0,553	1,672	1,185
4	30, 34, 51, 68	0,325	0,512	1,754	1,213
5	26, 30, 47, 51, 69	0,304	0,481	1,815	1,234
6	23, 27, 40, 44, 57, 70	0,289	0,454	1,862	1,249

Nota-se que ao introduzir ao menos um OR, a redução do deslocamento lateral já é de extrema relevância, com aproximadamente 39% de redução. À medida que a quantidade de ORs aumenta, a redução do deslocamento também continua a aumentar, entretanto, em uma taxa menor. Quando

existem 6 ORs, a porcentagem de redução chega a 59%. Ao adicionar o BT no modelo, a redução no MDL é ainda maior, de 48% para um OR-BT e 71% para seis OR-BT. Para os dois modelos analisados, com OR e OR-BT, tanto o MBN quanto a frequência natural de flexão melhoram com o acréscimo de novos ORs/ORs-BT e, por outro lado, a máxima aceleração piora. Destaca-se, também, que os pavimentos ótimos para ambos os casos são muito semelhantes.

Na Figura 5.1 é ilustrada a curva do MDL normalizado em relação ao número de iterações para seis ORs, resultante do processo de otimização com o algoritmo Nelder-Mead modificado. Neste exemplo em específico a convergência foi rápida, necessitando de apenas 71 iterações para obter o mínimo global.

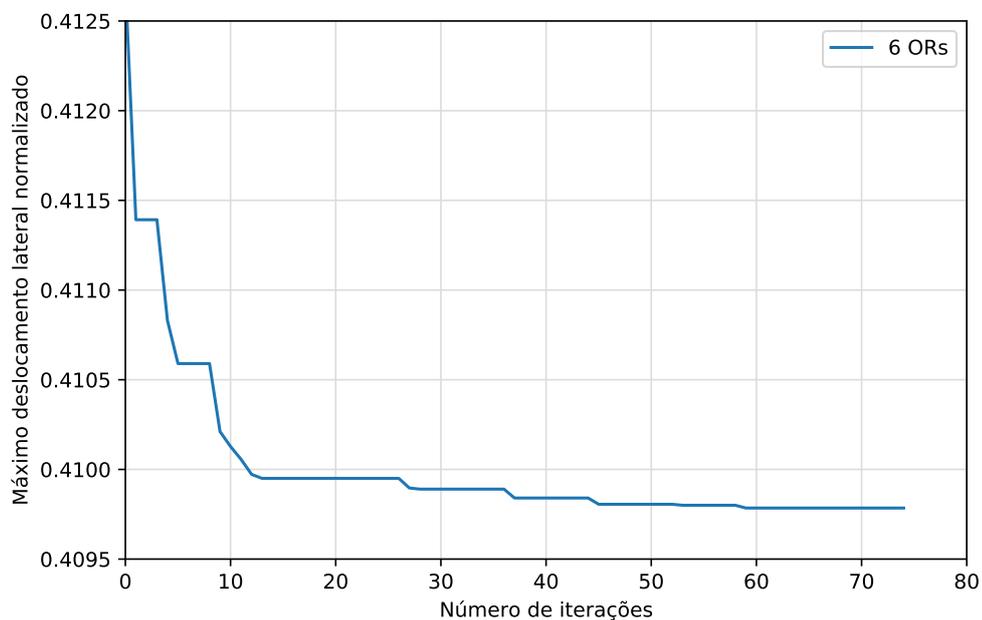


Figura 5.1 – Processo de otimização com o algoritmo Nelder-Mead modificado

5.1.2 Momento na base do núcleo

As Tabelas 5.3 e 5.4 mostram as posições ótimas obtidas para minimizar o momento na base do núcleo no modelo do edifício alto, com seus respectivos resultados normalizados pelos valores sem ORs-BTs. Assim como o MDL, o MBN segue o mesmo padrão, sempre melhorando os objetivos ao aumentar o número de ORs ou ORs-BTs, exceto no caso da máxima aceleração. No primeiro caso, somente com ORs, ao introduzir um OR no modelo, chega-se a 27% de redução do MBN e, quando existem seis ORs, 55%. Já no segundo caso, com ORs e BTs, com um OR-BT a redução é de 34% e com seis ORs-BTs, 68%.

Inicialmente a redução no objetivo MDL é mais acentuando do que o MBN. No entanto, conforme o número de ORs aumentam, ocorre uma suavização em ambas as curvas, convergindo para resultados próximos, como pode ser visto na Figura 5.2. Entre os dois objetivos observados, o

Tabela 5.3 – Resultados das otimizações mono-objetivo para o MBN (OR)

Quant. ORs	Posição ótima	MBN norm.	MDL norm.	Freq. nat. flexão norm.	Máx. acel. norm.
1	31	0,733	0,704	1,214	1,116
2	17, 34	0,625	0,632	1,287	1,143
3	11, 19, 35	0,56	0,603	1,32	1,154
4	8, 12, 20, 36	0,514	0,585	1,341	1,161
5	4, 9, 13, 21, 36	0,476	0,577	1,352	1,164
6	4, 8, 12, 16, 23, 37	0,446	0,554	1,382	1,174

Tabela 5.4 – Resultados das otimizações mono-objetivo para o MBN (OR-BT)

Quant. ORs-BTs	Posição ótima	MBN norm.	MDL norm.	Freq. nat. flexão norm.	Máx. acel. norm.
1	30	0,661	0,637	1,281	1,139
2	16, 33	0,534	0,555	1,379	1,172
3	12, 16, 34	0,452	0,524	1,422	1,184
4	4, 8, 18, 34	0,404	0,523	1,424	1,184
5	4, 8, 12, 16, 35	0,348	0,504	1,451	1,191
6	4, 8, 12, 16, 20, 36	0,316	0,465	1,515	1,212

MDL possui uma redução maior, com uma tendência de que se forem implementados mais do que seis ORs, o MBN seja menor. Se comparado com as posições ótimas observadas para ambos os objetivos, sempre resultam em posições inferiores para reduzir o MBN, independentemente do número de ORs.

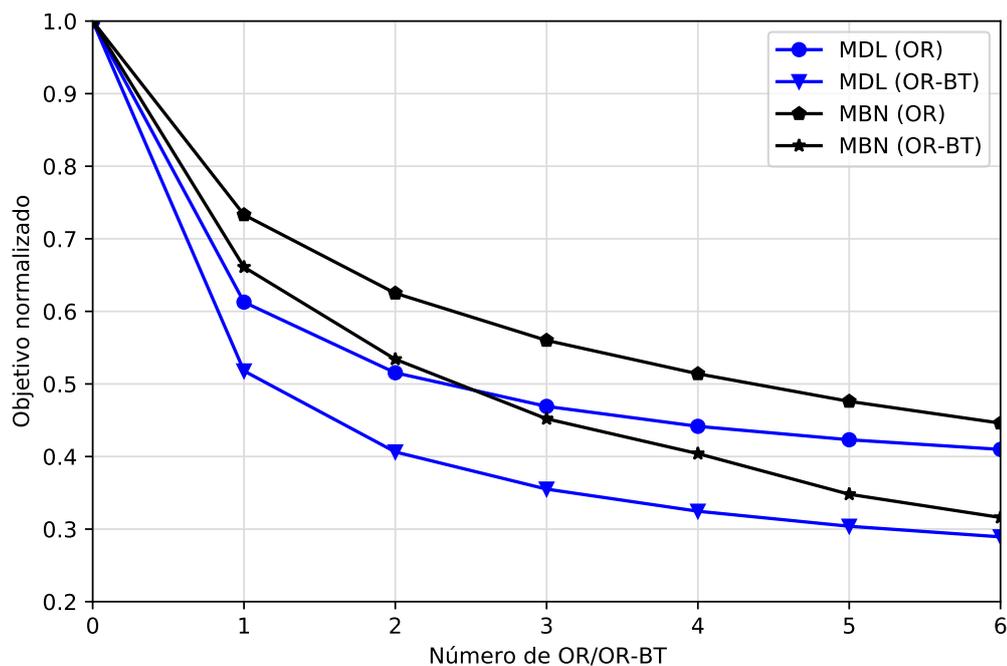


Figura 5.2 – Resultado de cada objetivo de acordo com o número de OR/OR-BT

Como já salientado, adicionar o BT ao modelo ajuda a melhorar ainda mais os objetivos principais. Nesse sentido, nota-se que é possível acrescentar menos ORs ao longo da altura do edifício se o BT estiver na solução, como pode ser visto para os dois casos apresentados na Figura 5.2. Diante das curvas do MDL, é possível afirmar que a solução com um OR-BT é equivalente a de dois ORs e a solução com dois ORs-BTs é equivalente à de seis ORs. Situação semelhante acontece com o MBN que, por exemplo, três ORs-BTs se equivalem a seis ORs.

5.1.3 Influência da não linearidade geométrica

Edifícios altos e esbeltos são casos típicos em que o somatório de pequenas deflexões laterais ao longo da altura geram grandes deslocamentos globais. Nesse sentido, devido às ações gravitacionais da estrutura, a não linearidade geométrica implica na adição de esforços solicitantes e deslocamentos, que podem corresponder a uma parcela significativa. No ANSYS a análise não linear geométrica (NLG) é realizada de maneira incremental, de modo que a carga é dividida em passos e a rigidez é atualizada em função dos deslocamentos. Para verificar a influência da NLG no modelo, apresenta-se na Figura 5.3 os resultados do processo de otimização considerando o MDL como objetivo em relação ao tempo de processamento, para o caso com um OR.

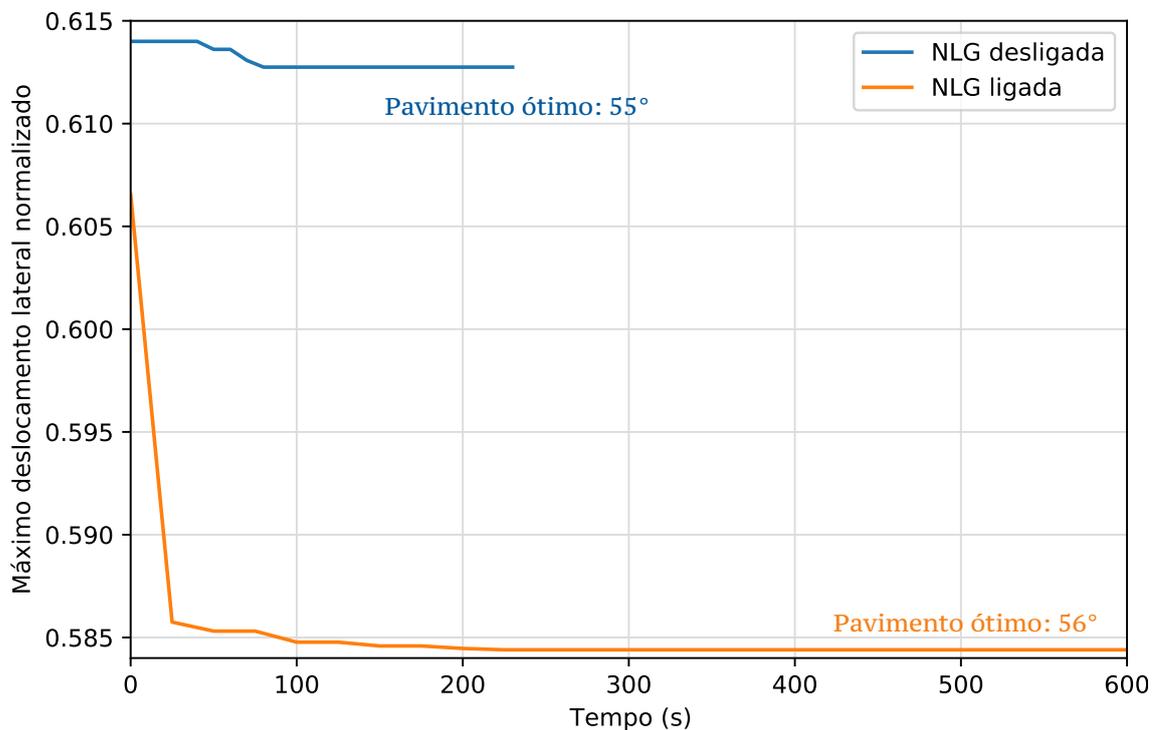


Figura 5.3 – Processo de otimização com e sem a análise não linear geométrica para um OR (MDL)

Sendo assim, pode-se concluir que ao considerar a NLG: (a) o MDL do modelo sem ORs/BTs passou de 0,732 m para 0,82 m; (b) a posição ótima do OR se altera do pavimento 55° para

o 56°, o que em termos da resposta do edifício é quase que desprezível; (c) a diferença dos resultados normalizados na posição ótima foi de 5%, passando de 0,61 para 0,58; e (d) o tempo para se obter o mínimo global aumentou em 2,5 vezes. Diante do aumento de tempo e pelos objetivos deste trabalho sempre estarem normalizados, é mais vantajoso analisar o modelo sem utilizar uma análise NLG.

5.2 RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO

Cada peso aplicado na Equação 3.34 fornece apenas um ponto ótimo na fronteira de Pareto. Com isso, é necessário discretizar o peso em um intervalo pequeno suficiente para se obter uma convergência nos resultados, ou seja, todas as soluções de Pareto. Nas Tabelas 5.5 e 5.6 são apresentados o número de posições ótimas conforme a discretização de peso ($d\omega$) adotada quando o modelo é constituído com ORs e ORs-BTs, respectivamente. No momento em que o algoritmo obtém a mesma quantidade de soluções na fronteira de Pareto em dois $d\omega$ consecutivos, o critério de parada é definido como atingido.

Tabela 5.5 – Número de posições ótimas conforme a discretização do peso (ORs)

Quant. ORs	$d\omega$						
	0,1	0,05	0,025	0,0125	0,00625	0,004	0,002
1	11	19	26	26	-	-	-
2	11	21	32	39	41	42	42

Tabela 5.6 – Número de posições ótimas conforme a discretização do peso (ORs-BTs)

Quant. ORs-BTs	$d\omega$							
	0,1	0,05	0,025	0,0125	0,00625	0,004	0,002	0,001
1	11	19	26	26	-	-	-	-
2	11	21	32	37	39	41	42	42

Conforme pode ser visto na Tabela 5.5, a discretização mínima de peso, $d\omega$, para atingir todos os pontos da fronteira para um e dois ORs são, respectivamente, 0,025 e 0,004. Quando o BT é adicionado ao modelo, segundo a Tabela 5.6, a discretização para um OR-BT permanece a mesma e, quando existem dois ORs-BTs, $d\omega$ diminui para 0,002. Os pontos extremos da fronteira de Pareto são os resultados da otimização mono-objetivo. No caso da otimização com um OR, as posições extremas são os andares 31 e 56, resultando em exatamente os 26 pontos encontrados. Portanto, mesmo que $d\omega$ fosse diminuído, a quantidade de posições seria a mesma. Um comportamento semelhante acontece para os demais casos.

A Figura 5.4 ilustra todos os pontos da fronteira de Pareto tanto para um e dois ORs, quanto um e dois ORs-BTs. Pode-se notar que a amplitude dos resultados para o MLD é mais perceptível

do que para o MBN. Em outras palavras, o MBN tem uma variação menor em comparação ao MLD. Como já demonstrado, a introdução do BT gera uma redução ainda maior nos objetivos. Outro ponto importante observado é a proximidade das fronteiras de dois ORs e um OR-BT, o que prova a eficiência do BT e expõe, possivelmente, uma solução mais viável.

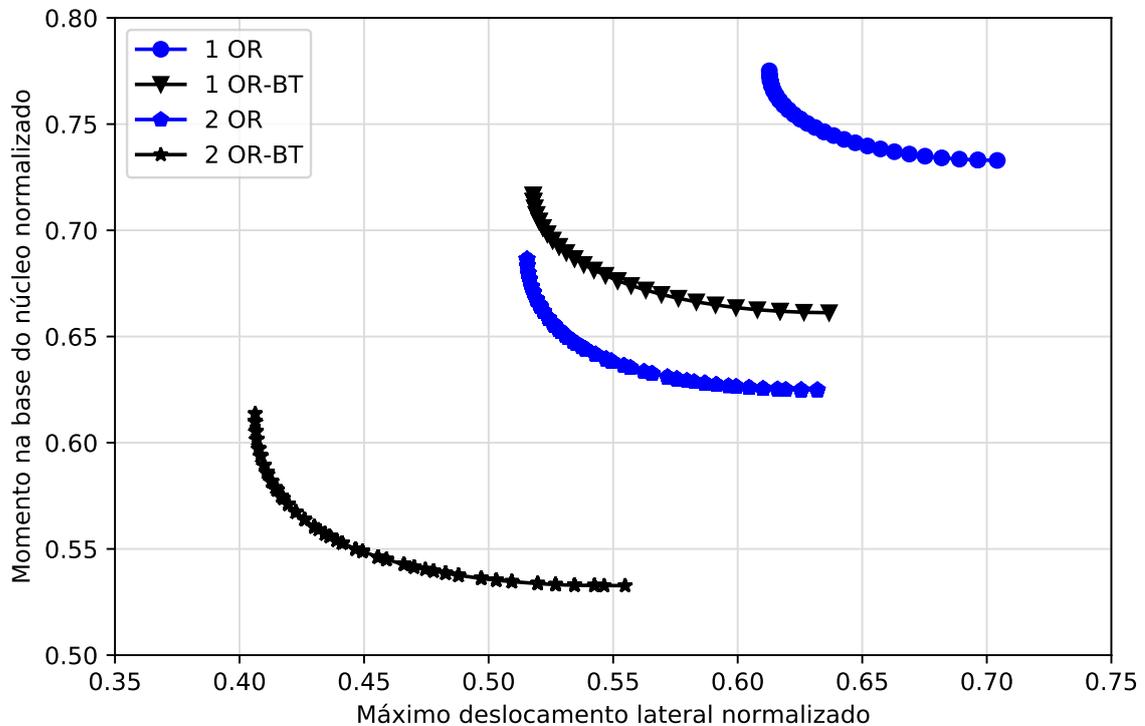


Figura 5.4 – Fronteira de Pareto para 1 e 2 ORs/ORs-BTs

A seguir pode-se observar todas as posições ótimas obtidas através das otimizações:

a) Modelo com ORs:

- 1 OR: todos os pavimentos do intervalo do 31 até o 56;
- 2 ORs: (17, 34); (17, 35); (17, 36); (18, 36); (18, 37); (18, 38); (18, 39); (19, 39); (19, 40); (19, 41); (19, 42); (20, 42); (20, 43); (20, 44); (21, 45); (21, 46); (22, 47); (22, 48); (23, 49); (23, 50); (24, 51); (25, 52); (25, 53); (26, 53); (26, 54); (27, 54); (27, 55); (28, 55); (28, 56); (29, 56); (29, 57); (30, 57); (31, 58); (32, 58); (32, 59); (33, 59); (34, 60); (35, 60); (36, 61); (37, 61); (38, 62); (39, 62);

b) Modelo com ORs-BTs:

- 1 OR-BT: todos os pavimentos do intervalo do 30 até o 55;
- 2 ORs-BTs: (16, 33); (16, 34); (17, 34); (17, 35); (17, 36); (17, 37); (18, 38); (18, 39); (18, 40); (19, 41); (19, 42); (19, 43); (20, 43); (20, 44); (20, 45); (21, 46); (21, 47); (22, 48); (22, 49); (23, 50); (23, 51); (24, 51); (24, 52); (25, 52); (25, 53); (26, 54); (27, 55); (28, 56); (29, 56); (29, 57); (30, 57); (30, 58); (31, 58); (32, 58); (32, 59); (33, 59); (34, 60); (35, 60); (36, 61); (37, 61); (38, 62); (39, 62);

Todos os pavimentos ótimos apresentados acima podem ser escolhidos para reduzir o MDL e o MBN. No entanto, caso o projetista deseje minimizar um dos objetivos a mais do que o outro, a escolha deve ser feita observando as posições dos ORs/ORs-BTs ao longo da altura do edifício. Quando o objetivo a ser priorizado for o MDL, dentre todas as opções a melhor combinação é aquela com os pavimentos posicionados mais na parte superior e, quando for o MBN, na parte inferior. Por exemplo, para um edifício alto com 2 ORs-BTs e a prioridade de reduzir o MBN, as posições dos ORs-BTs devem ser o mais próximo possível dos pavimentos 16° e 33°.

5.3 VALIDAÇÃO DO CÓDIGO

Para comprovar que o algoritmo Nelder-Mead modificado está realmente obtendo um mínimo global, realizou-se buscas exaustivas para três casos diferentes: (a) para uma otimização mono-objetivo considerando 2 ORs sendo o objetivo o MDL, conforme é mostrado na Figura 5.5; (b) para uma otimização multiobjetivo considerando 2 ORs, conforme é mostrado na Figura 5.6; e (c) para uma otimização multiobjetivo considerando 2 ORs-BTs, conforme é mostrado na Figura 5.7. Vale ressaltar que o gráfico da Figura 5.5 é simétrico porque não há diferença no valor da função objetivo quando o posicionamento do OR é alterado dentro da variável de projeto. A presença de diagonal contínua é meramente ilustrativa, pois ambos os ORs não podem estar presentes na mesma posição.

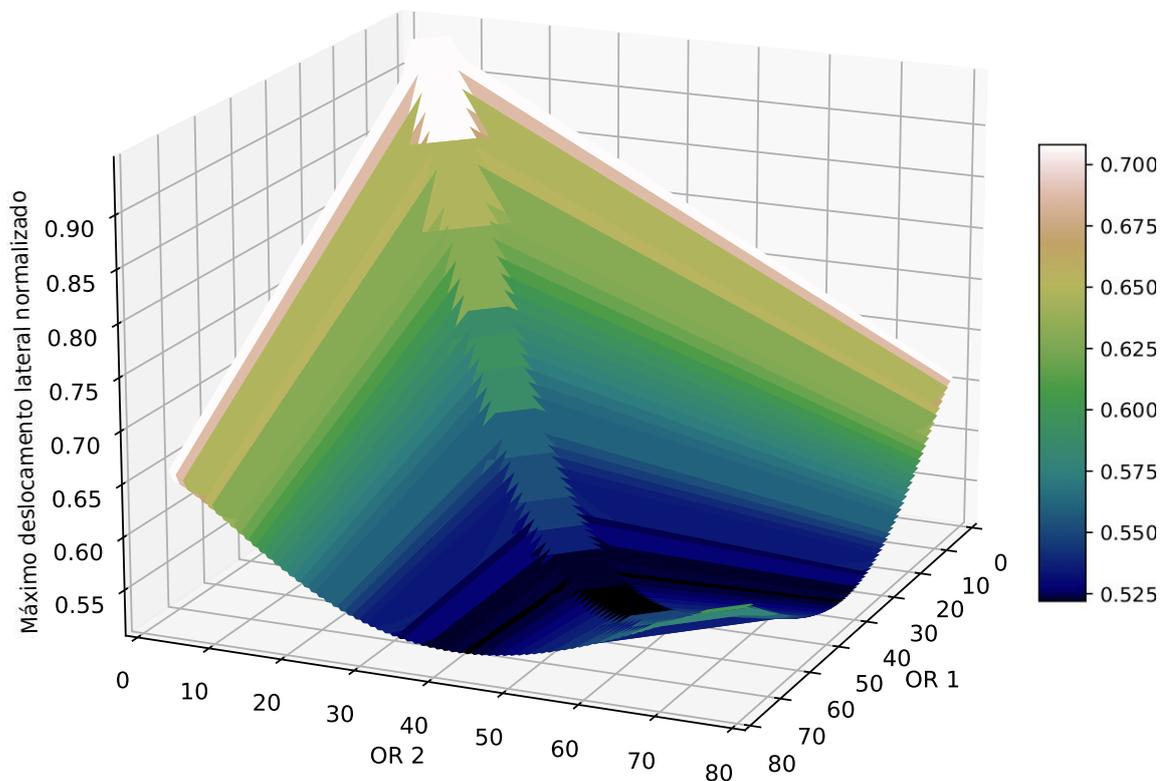


Figura 5.5 – Busca exaustiva com 2 ORs (Objetivo: MDL)

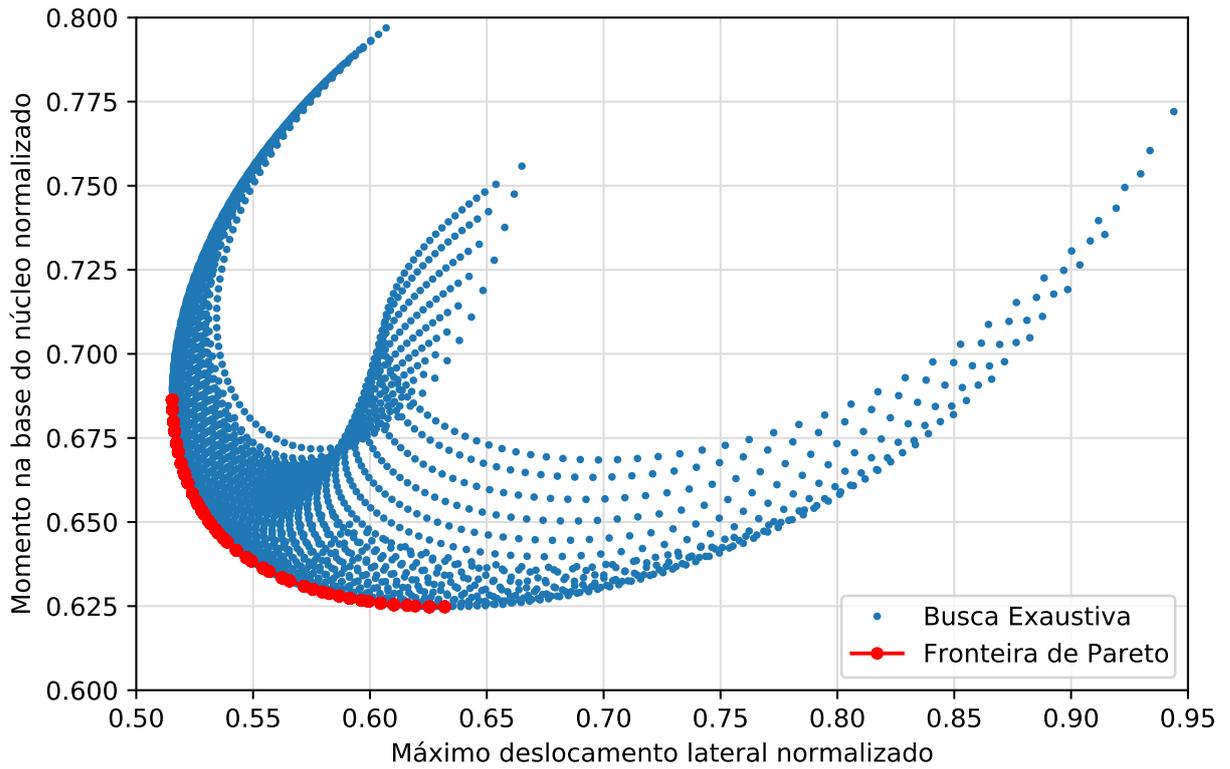


Figura 5.6 – Busca exaustiva com 2 ORs (Fronteira de Pareto)

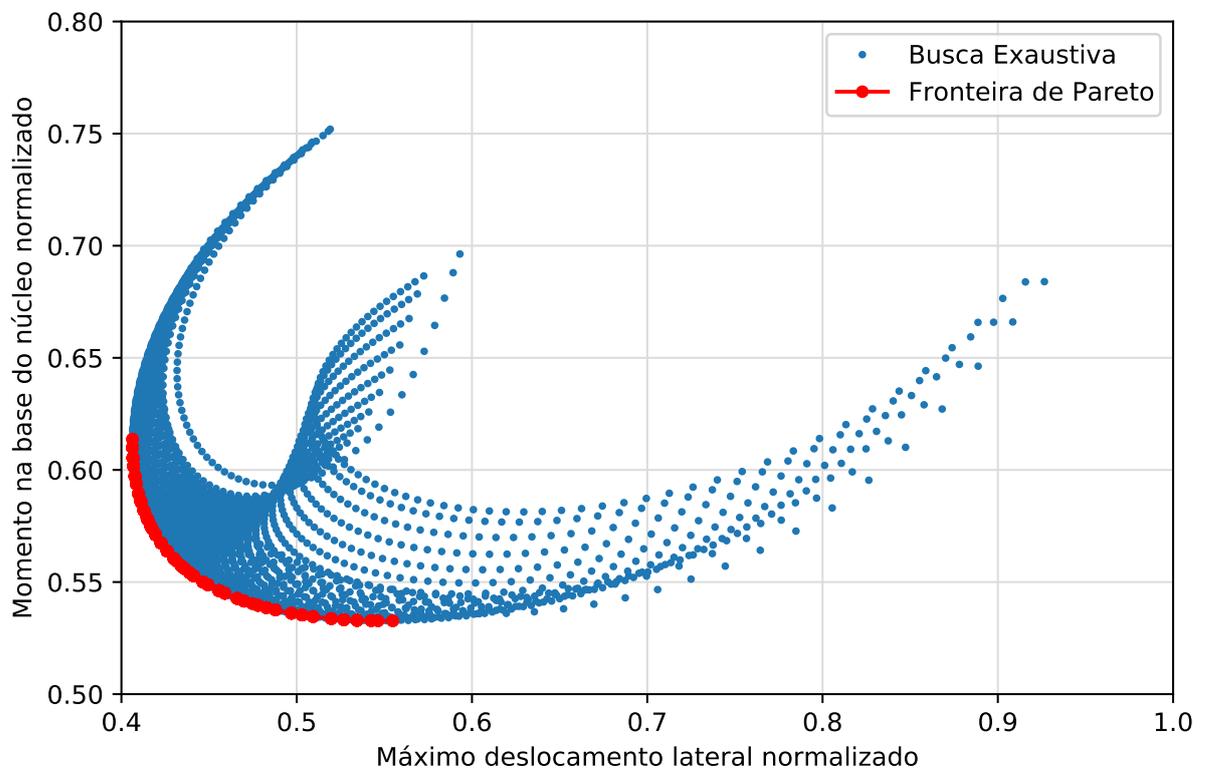


Figura 5.7 – Busca exaustiva com 2 ORs-BTs (Fronteira de Pareto)

Na primeira busca exaustiva ilustrada na Figura 5.5 observa-se que os pavimentos ideais para

posicionar os ORs são o 39° e o 62°, com resultado normalizado de 0,515, ou seja, exatamente os mesmos valores observados na otimização mono-objetivo da Tabela 5.1. Para obter o valor ótimo quando existem 2 ORs, independente do objetivo, utilizando o Nelder-Mead modificado são necessárias, em média, 30 iterações, contra 2701 chamadas ao programa ANSYS da busca exaustiva. O que evidencia, mais uma vez, a eficiência do algoritmo. Em relação às outras duas buscas exaustivas realizadas, chega-se à conclusão que ambas as fronteiras de Pareto obtidas através da otimização multiobjetivo estão posicionadas de maneira correta, possuindo, deste modo, somente pontos não-dominados aos demais.

6 CONCLUSÕES

Diante dos resultados e otimizações realizadas, este trabalho propôs um algoritmo e metodologia para indicar quais são as posições ótimas dos *outriggers* (ORs) ou *outriggers-belt-trusses* (ORs-BTs) para minimizar o máximo deslocamento lateral (MDL) e o momento na base do núcleo (MBN) em edifícios altos sob a ação de cargas laterais de vento, assim como a influência da implementação destes elementos na máxima aceleração e frequências naturais. Para tal, modelou-se um edifício alto através do método dos elementos finitos pelo programa ANSYS e, por meio do algoritmo Nelder-Mead, modificado pelo autor, foram determinadas as posições ótimas.

A comparação entre os resultados das análises para o edifício com e sem ORs/ORs-BTs comprova que o sistema de contraventamento é muito eficiente, tendo em vista as reduções nos critérios de projeto. Ao analisar os objetivos adotados neste trabalho, nota-se que os pavimentos ótimos são diferentes para cada um deles. No caso do MDL, estes pavimentos estão localizados mais na porção superior. Quando há apenas um OR/OR-BT, este encontra-se próximo a $0,7H$ e, quando são acrescentados novos elementos, estes se distribuem ao longo da altura. Já no caso do MBN, os pavimentos localizam-se na parte inferior, independentemente da quantidade de ORs/ORs-BTs. Quando existe um OR/OR-BT, este encontra-se a $0,37H$ e, quando são acrescentados novos elementos, estes se distribuem ao longo da parte inferior, numa faixa de $0,05 - 0,46H$. Kim, Lim e Lee (2020) considerando um modelo similar simplificado e adotando o deslocamento no topo do edifício como objetivo, obtêm o pavimento ótimo para um OR de $0,59H$. Diferença 16% em relação ao obtido no presente estudo, que pode ser justificada pela presença de diferentes rigidezes nos elementos do sistema OR e perfil do carregamento de vento.

Destaca-se que para o modelo de edifício alto empregado nas análises, a solução com um OR já seria suficiente para estar dentro do critério de deslocamento global, visto que o elemento possibilita uma redução de cerca de 39%. Caso fosse necessário, seria possível reduzir até 60% do deslocamento lateral se adicionados seis ORs em suas posições ótimas. Em contrapartida, se o MBN tivesse mais importância, introduzir um OR poderia diminuir-lo em 27%, ou 55% com seis ORs.

A vantagem de incorporar o BT ao sistema é a de reduzir ainda mais ambos os objetivos principais, utilizando menos pavimentos ao longo da altura. Esta solução permite que seja reduzido em 48% o MDL com um OR-BT, mesmo valor obtido com dois ORs. Caso fossem adicionados dois ORs-BTs a redução seria de 60%, o que é equivalente a seis ORs. Situação semelhante ocorre com o MBN, que três ORs-BTs são equivalentes a seis ORs.

O estudo realizado variando a relação de rigidez entre as colunas externas e o núcleo rígido comprova que existe uma determinada relação ótima dependendo do objetivo de interesse. Para se obter um arranjo ótimo com relação ao MDL e, tendo como base o modelo do edifício alto, seria necessário aumentar a rigidez do núcleo e diminuir a das colunas. O inverso é válido quando o objetivo é o MBN. Neste segundo caso, de fato, seria necessário implementar uma restrição, pois ao aumentar a relação o objetivo continua sempre a diminuir.

O resultado da otimização multiobjetivo fornece aos projetistas diversas opções para posicionar os ORs/ORs-BTs de acordo com seus interesses. De modo que escolher a melhor combinação de pavimentos, adequando-se a determinadas considerações de projeto e objetivo específico, não está condicionada aos extremos da fronteira de Pareto (resultado considerando apenas um objetivo), mas sim próximo a este, com pouca interferência em seu valor ótimo.

O algoritmo Nelder-Mead modificado, utilizado nas otimizações mono e multiobjetivo, foi determinante para realizar todas as otimizações no mínimo tempo possível. As modificações tornaram o algoritmo mais eficiente para otimizar problemas com variáveis inteiras, tendo em vista que ele foi testado através de 8 funções *benchmark* e apresentou bons resultados. Além disso, por meio de buscas exaustivas validou-se o algoritmo para o próprio problema do trabalho.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo deste trabalho foram constatadas diversas questões que poderiam ser implementadas em trabalhos futuros, as quais podem ser sumarizadas em:

- a) Verificar edifícios com outras geometrias ou outros materiais;
- b) Incluir uma análise não linear física no material concreto e considerar outros objetivos;
- c) Incluir efeitos dinâmicos e outros carregamentos, como os provenientes de sismos e/ou ventos simulados ao longo do tempo;
- d) Investigar o desempenho de outros algoritmos multiobjetivo;
- e) Criar um metamodelo para aceleração do processo de otimização;
- f) Otimizar o edifício alto de modo a minimizar o peso da estrutura.

REFERÊNCIAS

- ALHADDAD, W.; HALABI, Y.; XU, H.; LEI, H. A comprehensive introduction to outrigger and belt-truss system in skyscrapers. In: ELSEVIER. **Structures**. [S.l.], 2020. v. 27, p. 989–998.
- ALI, M. M. **Art of the skyscraper: the genius of Fazlur Khan**. [S.l.]: Rizzoli International Publications, 2001.
- ALI, M. M.; MOON, K. S. Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects. **Architectural science review**, Taylor & Francis, v. 50, n. 3, p. 205–223, 2007.
- _____. Advances in structural systems for tall buildings: emerging developments for contemporary urban giants. **Buildings**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 8, p. 104, 2018.
- ANSYS, I. Ansys mechanical apdl element reference. **ANSYS, Inc., USA**, 2021.
- ARORA, J. S. **Introduction to optimum design**. [S.l.]: Elsevier, 2004.
- ARROYO, J. E. C. **Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo**. 253 p. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2002.
- ASCE7-16. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. In: ASCE RESTON, VA. [S.l.], 2017.
- BISWAS, P.; PERONTO, J. **Design and Performance of Tall Buildings for Wind**. American Society of Civil Engineers, 2020. (ASCE manuals and reports on engineering practice). ISBN 9780784415658. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=RqmazQEACAAJ>>.
- BLESSMANN, J. **O vento na engenharia estrutural**. [S.l.]: Editora da UFRGS, 2013.
- CHEN, Y.; CAI, K.; WANG, X. Parameter study of framed-tube structures with outriggers using genetic algorithm. **The Structural Design of Tall and Special Buildings**, Wiley Online Library, v. 27, n. 14, p. e1499, 2018.
- CHEN, Y.; ZHANG, Z. Analysis of outrigger numbers and locations in outrigger braced structures using a multiobjective genetic algorithm. **The Structural Design of Tall and Special Buildings**, Wiley Online Library, v. 27, n. 1, p. e1408, 2018.
- CHOI, H. S.; HO, G.; JOSEPH, L.; MATHIAS, N. **Outrigger design for high-rise buildings**. [S.l.]: Routledge, 2017.
- CTBUH. **CTBUH Height Criteria for Measuring & Defining Tall Buildings**. 2021. [Online; acessado 16-Maio-2021]. Disponível em: <<http://www.ctbuh.org/HighRiseInfo/TallestDatabase/Criteria/tabid/446/language/en-US/Default.aspx>>.
- ELBAKHEIT, A. R. Why tall buildings? the potential of sustainable technologies in tall buildings. **International Journal of High-Rise Buildings**, Council on Tall Building and Urban Habitat Korea, v. 1, n. 2, p. 117–123, 2012.

- ELLIS, B. R. An assessment of the accuracy of predicting the fundamental natural frequencies of buildings and the implications concerning the dynamic analysis of structures. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, Thomas Telford-ICE Virtual Library, v. 69, n. 3, p. 763–776, 1980.
- FANG, B.; ZHAO, X.; YUAN, J.; WU, X. Outrigger system analysis and design under time-dependent actions for super-tall steel buildings. **The Structural Design of Tall and Special Buildings**, Wiley Online Library, v. 27, n. 12, p. e1492, 2018.
- FU, F. **Design and analysis of tall and complex structures**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2018.
- GUNEL, M. H.; ILGIN, H. E. A proposal for the classification of structural systems of tall buildings. **Building and environment**, Elsevier, v. 42, n. 7, p. 2667–2675, 2007.
- _____. **Tall buildings: structural systems and aerodynamic form**. [S.l.]: Routledge, 2014.
- IRWIN, P.; KILPATRICK, J.; ROBINSON, J.; FRISQUE, A. Wind and tall buildings: negatives and positives. **The structural design of tall and special buildings**, Wiley Online Library, v. 17, n. 5, p. 915–928, 2008.
- KIM, H.-S.; LEE, H.-L.; LIM, Y.-J. Multi-objective optimization of dual-purpose outriggers in tall buildings to reduce lateral displacement and differential axial shortening. **Engineering Structures**, Elsevier, v. 189, p. 296–308, 2019.
- KIM, H.-S.; LIM, Y.-J.; LEE, H.-L. Optimum location of outrigger in tall buildings using finite element analysis and gradient-based optimization method. **Journal of Building Engineering**, Elsevier, v. 31, p. 101379, 2020.
- KIM, J.; PARK, J. Progressive collapse resisting capacity of building structures with outrigger trusses. **The Structural Design of Tall and Special Buildings**, Wiley Online Library, v. 21, n. 8, p. 566–577, 2012.
- LAME, A. **Optimization of outrigger structures**. Tese (Doutorado) — Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- LEE, S.; TOVAR, A. Outrigger placement in tall buildings using topology optimization. **Engineering Structures**, Elsevier, v. 74, p. 122–129, 2014.
- LUCHI, F.; KROHLING, R. A. Differential evolution and nelder-mead for constrained non-linear integer optimization problems. **Procedia Computer Science**, Elsevier, v. 55, p. 668–677, 2015.
- MENDIS, P.; NGO, T.; HARITOS, N.; HIRA, A.; SAMALI, B.; CHEUNG, J. Wind loading on tall buildings. **Electronic Journal of Structural Engineering**, 2007.
- MOON, K. S. Outrigger systems for structural design of complex-shaped tall buildings. **International Journal of High-Rise Buildings**, Council on Tall Building and Urban Habitat Korea, v. 5, n. 1, p. 13–20, 2016.
- NANDURI, P. R. K.; SURESH, B.; HUSSAIN, M. I. Optimum position of outrigger system for high-rise reinforced concrete buildings under wind and earthquake loadings. **American Journal of Engineering Research**, v. 2, n. 8, p. 76–89, 2013.

- NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. **The computer journal**, Oxford University Press, v. 7, n. 4, p. 308–313, 1965.
- NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. **Numerical optimization**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006.
- PARK, H. S.; LEE, E.; CHOI, S. W.; OH, B. K.; CHO, T.; KIM, Y. Genetic-algorithm-based minimum weight design of an outrigger system for high-rise buildings. **Engineering Structures**, Elsevier, v. 117, p. 496–505, 2016.
- RAO, B. V.; LAKSHMI, T. M.; ALAPATI, M.; VISWANATH, G. Study on optimum location of outrigger for high-rise building. In: **Recent Developments in Sustainable Infrastructure**. [S.l.]: Springer, 2021. p. 337–344.
- SMITH, B. S.; COULL, A. **Tall building structures: analysis and design**. [S.l.]: Wiley-Interscience, 1991.
- TAN, P.; FANG, C.; CHANG, C.; SPENCER, B.; ZHOU, F. Dynamic characteristics of novel energy dissipation systems with damped outriggers. **Engineering Structures**, Elsevier, v. 98, p. 128–140, 2015.
- TARANATH, B. S. **Reinforced concrete design of tall buildings**. [S.l.]: CRC press, 2009.
- _____. **Structural analysis and design of tall buildings: Steel and composite construction**. [S.l.]: CRC press, 2016.
- WIKIPÉDIA. **Lista dos arranha-céus mais altos do Brasil — Wikipédia, a enciclopédia livre**. 2021. [Online; acessado 16-Maio-2021]. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Lista_dos_arranha-céus_mais_altos_do_Brasil>.
- XING, L.; ZHOU, Y.; HUANG, W. Seismic optimization analysis of high-rise buildings with a buckling-restrained brace outrigger system. **Engineering structures**, Elsevier, v. 220, p. 110959, 2020.
- ZHOU, Y.; ZHANG, C.; LU, X. Seismic performance of a damping outrigger system for tall buildings. **Structural Control and Health Monitoring**, Wiley Online Library, v. 24, n. 1, p. e1864, 2017.

APÊNDICES

APÊNDICE A – ROTINA PARAMETRIZÁVEL EM APDL

Neste Apêndice é apresentado a rotina parametrizável do modelo de edifício alto com o sistema OR na linguagem APDL.

```

FINISH          !Finaliza tudo que está aberto
/CLEAR,NOSTART !Limpa tudo que está aberto
/PREP7
/title, Modelo de edificio alto (Sistema OR-BT)

!+-----+
!   DIMENSÕES EM PLANTA DO EDIFÍCIO E CARACTERÍSTICAS
!+-----+

Lx1=14          !Dimensão entre pilares externos e Shearwall x [m]
Lx2=15          !Dimensão do núcleo central x [m]
Ly1=14          !Dimensão entre pilares externos e Shearwall y [m]
Ly2=15          !Dimensão do núcleo central y [m]
pd=3.5          !Pé direito do edifício [m]
npav=80         !Número de pavimentos [adm]
nor=1           !Número de outriggers [adm]
*DIM,posicao,array,nor !Dimensionamento de um vetor contendo
                    as posições dos outriggers
posicao(1)= 40    !No. do pavimento em que se encontra
                    os outriggers
VAR_OR=1         !Caso VAR_OR=1 - OR incluído;
                    VAR_OR=0 - OR não incluído
VAR_BELT=1       !Caso VAR_BELT=1 - Belt-truss incluído;
                    VAR_BELT=0 - Belt-truss não incluído

!+-----+
!CRIAR KEYPOINTS DOS NÓS
K,1,0,0,0       !Keypoints dos arranques
K,2,Lx1,0,0
K,3,Lx1+Lx2,0,0
K,4,2*Lx1+Lx2,0,0

```

```

K, 5, 0, Ly1, 0
K, 6, Lx1, Ly1, 0
K, 7, Lx1+Lx2, Ly1, 0
K, 8, 2*Lx1+Lx2, Ly1, 0
K, 9, 0, Ly1+Ly2, 0
K, 10, Lx1, Ly1+Ly2, 0
K, 11, Lx1+Lx2, Ly1+Ly2, 0
K, 12, 2*Lx1+Lx2, Ly1+Ly2, 0
K, 13, 0, 2*Ly1+Ly2, 0
K, 14, Lx1, 2*Ly1+Ly2, 0
K, 15, Lx1+Lx2, 2*Ly1+Ly2, 0
K, 16, 2*Lx1+Lx2, 2*Ly1+Ly2, 0
!
K, 17, 0, 0, pd          !Keypoints dos 1ro pavimento
K, 18, Lx1, 0, pd
K, 19, Lx1+Lx2, 0, pd
K, 20, 2*Lx1+Lx2, 0, pd
K, 21, 0, Ly1, pd
K, 22, Lx1, Ly1, pd
K, 23, Lx1+Lx2, Ly1, pd
K, 24, 2*Lx1+Lx2, Ly1, pd
K, 25, 0, Ly1+Ly2, pd
K, 26, Lx1, Ly1+Ly2, pd
K, 27, Lx1+Lx2, Ly1+Ly2, pd
K, 28, 2*Lx1+Lx2, Ly1+Ly2, pd
K, 29, 0, 2*Ly1+Ly2, pd
K, 30, Lx1, 2*Ly1+Ly2, pd
K, 31, Lx1+Lx2, 2*Ly1+Ly2, pd
K, 32, 2*Lx1+Lx2, 2*Ly1+Ly2, pd
!+-----+

!+-----+
!      VIGAS DE AÇO - SHEAR CONNECTED BEAM (ELEMENTO 1)
!+-----+

!PARÂMETROS DO ELEMENTO 1
E_c1=210E9          !Modulo Young aço [N/m^2]
dens_c1=7800        !Densidade do aço [kg/m^3]
mu_c1=0.3           !Poisson [adm]

```

```

A1=0.08                !Área viga horizontal [m²]

!MATERIAL 1
MP,EX,1,E_c1          !Módulo Young
MP,DENS,1,dens_c1    !Densidade
MP,PRXY,1,mu_c1      !Coeficiente de Poisson

!ELEMENTO 1
ET,1,LINK180         !Elemento treliça
SECTYPE,1,LINK,,VIGAHOR !Definição do tipo de elemento
                        da seção 1
SECDATA,A1           !Seção transversal

!CRIA AS LINHAS DO ELEMENTO 1
L,17,18 !Linhas dos keypoints das vigas do 1ro pavimento
L,18,19
L,19,20
L,17,21
L,18,22
L,19,23
L,20,24
L,21,22
L,23,24
L,21,25
L,24,28
L,25,26
L,27,28
L,25,29
L,26,30
L,27,31
L,28,32
L,29,30
L,30,31
L,31,32

!ELEMENTOS DIAGONAIS NO PLANO
L,17,22
L,18,21
L,22,25

```

```

L,21,26
L,25,30
L,26,29
L,26,31
L,27,30
L,27,32
L,28,31
L,23,28
L,27,24
L,19,24
L,20,23
L,18,23
L,19,22

```

```

!DEFINE ATRIBUTOS DA MALHA NOS ELEMENTOS GEOMÉTRICOS
LSEL,ALL           !Reseta a seleção selecionando tudo
LESIZE,ALL,,1     !Define quantidade de elementos por linha
                  !das linhas previamente selecionadas
LATT,1,,1,,,,1    !Atribui elementos, propriedades para
                  !as linhas selecionadas

```

```

!+-----+
!   PILARES EXTERNOS DE CONCRETO ARMADO (ELEMENTO 2)
!+-----+

```

```

!PARÂMETROS DO ELEMENTO 2
fck2e3=50 !Resistência características concreto (Pilares) [MPa]
E_c2e3=1E6*5600*(fck2e3)**(0.5) !Módulo Young concreto [N/m^2]
dens_c2e3=2400                    !Densidade do concreto [kg/m^3]
mu_c2e3=0.2                       !Poisson [adm]
b2e3=1.5                          !Base da coluna [m]
h2e3=1.2                          !Altura da coluna [m]
ndiv_PE=2 !Número de divisões pilares externos [adm]

```

```

!MATERIAL 2 E 3
MP,EX,2,E_c2e3           !Módulo Young
MP,DENS,2,dens_c2e3     !Densidade
MP,PRXY,2,mu_c2e3      !Coeficiente de Poisson
!

```

```

MP,EX,3,E_c2e3           !Módulo Young
MP,DENS,3,dens_c2e3     !Densidade
MP,PRXY,3,mu_c2e3      !Coeficiente de Poisson

!ELEMENTO 2
ET,2,BEAM188           !Elemento viga 3D
KEYOPT,2,3,2          !Função de forma quadrática
SECTYPE,2,BEAM,RECT,PILARhx !Definição da seção retangular
                             para a coluna 2
SECDATA,h2e3,b2e3     !Seção transversal retangular
!
SECTYPE,3,BEAM,RECT,PILARhy !Definição da seção retangular
                             para a coluna 3
SECDATA,b2e3,h2e3     !Seção transversal retangular

!CRIA AS LINHAS DO ELEMENTO 2
L,1,17           !Linhas conectando arranque para 1ro pavimento
L,2,18
L,3,19
L,4,20
L,5,21
L,8,24
L,9,25
L,12,28
L,13,29
L,14,30
L,15,31
L,16,32

!DEFINE ATRIBUTOS DA MALHA NOS ELEMENTOS GEOMÉTRICOS
!Pilares com altura DIR. y
LSEL,ALL           !Selecione todas as linhas
LSEL,S,LINE,,38,40,1 !Seleciona as linhas específicas
LSEL,A,LINE,,45,47,1 !Seleciona as linhas específicas
LESIZE,ALL,, ,ndiv_PE !Define quantidade de elementos por linha
LATT,3,,2,, , ,3     !Atribui elementos, propriedades para as
                             linhas selecionadas
!
!Pilares com altura DIR. x

```

```

LSEL,ALL                !Selecione todas as linhas
LSEL,S,LINE,,37        !Seleciona as linhas específicas
LSEL,A,LINE,,41,44,1
LSEL,A,LINE,,48
LESIZE,ALL,, ,ndiv_PE !Define quantidade de elementos por linha
LATT,2,,2,, ,2        !Atribui elementos, propriedades para as
                        linhas selecionadas

```

!CÓPIA DOS PAVIMENTOS

```

LSEL,ALL !Selecione todas as linhas
LGEN,npav,ALL,0,0,0,0,pd,16,1,0 !Copie npav vezes para
                                cima defasadas do pé-direito
NUMMRG,KP,0.001,0.001,,LOW !Faça a fusão de keypoints que
                                estejam muito próximos

```

```

!+-----+
!           OUTRIGGER/BELT-TRUSS DE AÇO (ELEMENTO 3)
!+-----+

```

!PARÂMETROS DO ELEMENTO 3

```

E_c4_8=210E9           !Módulo Young aço [N/m^2]
dens_c4_8=7800         !Densidade do aço [kg/m^3]
mu_c4_8=0.3           !Poisson [adm]
A4=0.06               !Àrea do OR horizontal [m^2]
A5=A4*SQRT(2)         !Àrea do OR diagonal [m^2]
A7=0.06               !Àrea do Belt-Truss horizontal [m^2]
A8=A7*SQRT(2)         !Àrea do Belt-Truss diagonal [m^2]

```

!MATERIAL 4, 5, 7 E 8

```

MP,EX,4,E_c4_8        !Módulo Young
MP,DENS,4,dens_c4_8   !Densidade
MP,PRXY,4,mu_c4_8    !Coeficiente de Poisson
!
MP,EX,5,E_c4_8        !Módulo Young
MP,DENS,5,dens_c4_8   !Densidade
MP,PRXY,5,mu_c4_8    !Coeficiente de Poisson
!
MP,EX,7,E_c4_8        !Módulo Young
MP,DENS,7,dens_c4_8   !Densidade

```

```

MP,PRXY,7,mu_c4_8          !Coeficiente de Poisson
!
MP,EX,8,E_c4_8            !Módulo Young
MP,DENS,8,dens_c4_8       !Densidade
MP,PRXY,8,mu_c4_8        !Coeficiente de Poisson

!ELEMENTO 3
ET,3,LINK180             !Elemento treliça 3D (Outrigger)
ET,5,LINK180             !Elemento treliça 3D (Belt-truss)

SECTYPE,4,LINK,,ORHOR    !Definição do tipo de elemento da
                          seção 4
SECDATA,A4,              !Seção transversal
!
SECTYPE,5,LINK,,ORDIAG   !Definição do tipo de elemento da
                          seção 5
SECDATA,A5,              !Seção transversal
!
SECTYPE,7,LINK,,BELTHOR  !Definição do tipo de elemento da
                          seção 7
SECDATA,A7,              !Seção transversal
!
SECTYPE,8,LINK,,BELTDIAG !Definição do tipo de elemento da
                          seção 8
SECDATA,A8,              !Seção transversal

!CRIA OS OUTRIGGERS
*IF,VAR_OR,EQ,1,THEN
  !CRIA AS LINHAS DOS OUTRIGGERS/DEFINI ATRIBUITOS DA MALHA
  *DO,i,1,nor,1          !Laço sobre todos os outriggers
    koc=posicao(i)*16+1 !Avalia qual o Keypoint de canto
                          (inferior esquerdo) do pavimento
    koci=(posicao(i)-3)*16+1 !Keypoint de canto de 4
                          pavimentos abaixo do atual
    por=(posicao(i)-3)*pd !Altura do OUTRIGGER horizontal

  !OUTRIGGERS INCLINADOS
  LSEL,ALL               !Seleciona todas as linhas
  LSEL,NONE              !Desseleciona todas as linhas

```

```

L,koc+5,koci+1
L,koc+6,koci+2
L,koc+5,koci+4
L,koc+6,koci+7
L,koc+9,koci+8
L,koc+10,koci+11
L,koc+9,koci+13
L,koc+10,koci+14
LESIZE,ALL,,1 !Define quantidade de elementos
                por linha
LATT,5,,3,,,,5 !Atribui elementos, propriedades para
                as linhas selecionadas

!OUTRIGGERS HORIZONTAIS
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,por
LSEL,R,LOC,X,LX1
LSEL,U,LOC,Y,LY1+LY2/2
LESIZE,ALL,,1 !Define quantidade de elementos
                por linha
LATT,4,,3,,,,4 !Atribui elementos, propriedades para
                as linhas selecionadas

!
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,por
LSEL,R,LOC,X,LX1+LX2
LSEL,U,LOC,Y,LY1+LY2/2
LESIZE,ALL,,1 !Define quantidade de elementos
                por linha
LATT,4,,3,,,,4 !Atribui elementos, propriedades para
                as linhas selecionadas

!
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,por
LSEL,R,LOC,y,LY1
LSEL,U,LOC,X,LX1+LX2/2
LESIZE,ALL,,1 !Define quantidade de elementos
                por linha
LATT,4,,3,,,,4 !Atribui elementos, propriedades para

```

```

                                as linhas selecionadas
!
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,por
LSEL,R,LOC,y,LY1+LY2
LSEL,U,LOC,X,LX1+LX2/2
LESIZE,ALL,,1 !Define quantidade de elementos
                por linha
LATT,4,,3,,,4 !Atribui elementos, propriedades para
                as linhas selecionadas

*ENDDO
*ENDIF

!CRIA MATRIZES PARA ARMAZENAR OS KEYPOINTS DE INTERESSE
*DIM,KEYP_INF,ARRAY,2,4      !Cria uma matriz com 4 keypoint
                            por linha
*DIM,KEYP_SUP,ARRAY,2,4      !Cria uma matriz com 4 keypoint
                            por linha
*DIM,KEYP_LAT_ESQ,ARRAY,2,4  !Cria uma matriz com 4 keypoint
                            por linha
*DIM,KEYP_LAT_DIR,ARRAY,2,4  !Cria uma matriz com 4 keypoint
                            por linha

!CRIA OS BELT-TRUSSES
*IF,VAR_BELT,EQ,1,THEN
ALLSEL,ALL !Reseta a seleção
!CRIA AS LINHAS DOS BELT-TRUSSES/DEFINI ATRIBUITOS DA MALHA
*DO,i,1,nor,1                !Laço sobre todos os outriggers

KIE1=posicao(i)*16+1 !Avalia qual o Keypoint de canto (inferior
                    esquerdo) do pavimento em questão
KIE2=(posicao(i)-3)*16+1 !Keypoint de canto de 4 pavimentos
                        abaixo do atual
por=(posicao(i)-3)*pd        !Altura do OUTRIGGER horizontal

*DO,j,1,4,1 !Laço para capturar todos os keypoints de interesse
KEYP_INF(1,j)=KIE1+(j-1)
KEYP_INF(2,j)=KIE2+(j-1)

```

```

KEYP_SUP (1, j) = KIE1 + 12 + (j - 1)
KEYP_SUP (2, j) = KIE2 + 12 + (j - 1)
KEYP_LAT_ESQ (1, j) = KIE1 + (j - 1) * 4
KEYP_LAT_ESQ (2, j) = KIE2 + (j - 1) * 4
KEYP_LAT_DIR (1, j) = KIE1 + 3 + (j - 1) * 4
KEYP_LAT_DIR (2, j) = KIE2 + 3 + (j - 1) * 4
*ENDDO

*DO, j, 1, 3, 1 !Laço para criar as linhas do Belt-Truss
LSEL, ALL !Seleciona todas as linhas
L, KEYP_INF (1, j), KEYP_INF (2, j + 1)
L, KEYP_INF (2, j), KEYP_INF (1, j + 1)
L, KEYP_SUP (1, j), KEYP_SUP (2, j + 1)
L, KEYP_SUP (2, j), KEYP_SUP (1, j + 1)
L, KEYP_LAT_ESQ (1, j), KEYP_LAT_ESQ (2, j + 1)
L, KEYP_LAT_ESQ (2, j), KEYP_LAT_ESQ (1, j + 1)
L, KEYP_LAT_DIR (1, j), KEYP_LAT_DIR (2, j + 1)
L, KEYP_LAT_DIR (2, j), KEYP_LAT_DIR (1, j + 1)
*ENDDO

!BELT-TRUSSES HORIZONTAIS
LSEL, ALL !Seleciona todas as linhas
LSEL, S, LOC, Z, por
LSEL, A, LOC, Z, por + 3 * pd
LSEL, R, LOC, X, 0
LESIZE, ALL, , , 1 !Define quantidade de elementos por linha
LATT, 7, , 5, , , , 7 !Atribui elementos, propriedades para as
linhas selecionadas

LSEL, ALL !Seleciona todas as linhas
LSEL, S, LOC, Z, por
LSEL, A, LOC, Z, por + 3 * pd
LSEL, R, LOC, X, (2 * Lx1 + Lx2)
LESIZE, ALL, , , 1 !Define quantidade de elementos por linha
LATT, 7, , 5, , , , 7 !Atribui elementos, propriedades para as
linhas selecionadas

LSEL, ALL !Seleciona todas as linhas
LSEL, S, LOC, Z, por

```

```

LSEL,A,LOC,Z,por+3*pd
LSEL,R,LOC,Y,0
LESIZE,ALL,,1 !Define quantidade de elementos por linha
LATT,7,,5,,,,7 !Atribui elementos, propriedades para
                 as linhas selecionadas

LSEL,ALL !Seleciona todas as linhas
LSEL,S,LOC,Z,por
LSEL,A,LOC,Z,por+3*pd
LSEL,R,LOC,Y,(2*Ly1+Ly2)
LESIZE,ALL,,1 !Define quantidade de elementos por linha
LATT,7,,5,,,,7 !Atribui elementos, propriedades para
                 as linhas selecionadas

!BELT-TRUSSES DIAGONAIS
LSEL,ALL !Seleciona todas as linhas
LSEL,S,LOC,X,Lx1/2
LSEL,A,LOC,X,Lx1+(Lx2/2)
LSEL,A,LOC,X,(Lx1+Lx2+Lx1/2)
LSEL,A,LOC,Y,Ly1/2
LSEL,A,LOC,Y,Ly1+(Ly2/2)
LSEL,A,LOC,Y,(Ly1+Ly2+Ly1/2)
LSEL,R,LOC,Z,por+(3*pd/2)
LSEL,U,LOC,X,Lx1
LSEL,U,LOC,X,Lx1+Lx2
LSEL,U,LOC,Y,Ly1
LSEL,U,LOC,Y,Ly1+ly2
LESIZE,ALL,,1 !Define quantidade de elementos por linha
LATT,8,,5,,,,8 !Atribui elementos, propriedades para
                 as linhas selecionadas

*ENDDO
*ENDIF

!+-----+
!CRIAR A MALHA DE ELEMENTOS FINITOS (LINHAS)
LSEL,ALL !Seleciona todas as linhas
LMESH,ALL !Cria a malha de todas as linhas
!+-----+

```

```

!+-----+
! CASCA DO SHEAR-WALL DE CONCRETO (ELEMENTO 4)
!+-----+

!PARÂMETROS DO ELEMENTO 4
fck6=50 !Resistência características concreto [MPa]
E_c6=1E6*5600*(fck6)**(0.5) !Módulo Young concreto [N/m^2]
dens_c6=2400 !Densidade do concreto [kg/m^3]
mu_c6=0.2 !Poisson [adm]
esp6=0.8 !Espessura do Shear-wall [m]
ndiv_SW=1 !Número de divisões na altura do shear-wall [adm]
t_ndiv=pd/ndiv_SW !Tamanho da divisão na altura [m]

!MATERIAL 6
MP,EX,6,E_c6 !Módulo Young
MP,DENS,6,dens_c6 !Densidade
MP,PRXY,6,mu_c6 !Coeficiente de Poisson

!ELEMENTO 4
ET,4,SHELL181 !Elemento de Casca 6DOF
!KEYOPT,4,3,2
SECTYPE,6,SHELL,,SHEARWALL !Definição do tipo de elemento
da seção 6
SECDATA,esp6,6,0, !Seção transversal da seção 6

!CRIAR AS LINHAS AUXILIARES DO SHEARWALL (ELEMENTO 4)
L,6,7 !Linhas entre keypoints do térreo do shear-wall
L,6,10
L,7,11
L,10,11
!
L,6,22
L,7,23
L,10,26
L,11,27
!
L,22,23
L,22,26
L,23,27

```

L,26,27

```
!CRIAR AS AREAS DO SHEARWALL
ALLSEL,ALL !Reseta a seleção
A,6,22,23,7 !Defina as áreas do shear-wall no pavimento térreo
A,6,22,26,10
A,10,26,27,11
A,7,23,27,11
```

```
!COPIAR AS AREAS NA DIR. Z
ASEL,all !Seleciona todas as áreas atuais
AGEN,npav,ALL,0,0,0,0,pd,0,1,0 !Copie npav vezes as áreas para
cima defasadas do pé-direito
```

```
!DEFINE ATRIBUTOS DA MALHA NOS ELEMENTOS GEOMÉTRICOS
ASEL,ALL !Reseta a seleção
AESIZE,ALL,t_ndiv
AATT,6,,4,,6 !Atribui elementos, propriedades para as
áreas selecionadas
NUMMRG,KP,0.001,0.001,,LOW !Faz a fusão de keypoints próximos
```

```
!+-----+
!CRIAR A MALHA DE ELEMENTOS FINITOS (ÀREAS)
ASEL,ALL !Seleciona todas as áreas
AMESH,ALL !Cria a malha de todas as áreas
!+-----+
```

```
!+-----+
!
! SOLUÇÃO DO PROBLEMA
!+-----+
FINISH !Finaliza a análise
```

```
/SOLU !Entra no modo de solução
ANTYPE,MODAL !Análise modal
MODOPT,SUBSP,10 !Subespaço (10 modos)
EQSLV,FRONT !Solução: Frontal
MXPAND,10 !Expande 10 modos
MODOPT,SUBSP,10,0,2,,ON !Opções da análise modal [0-2hz]
(ON)Normaliza pela unidade
```

(OFF)Normaliza pela massa

```

!APLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO DOS KEYPOINTS E LINES
ALLSEL,ALL      !Reseta a seleção
KSEL,S,LOC,Z,0
KSEL,U,KP,,6,7
KSEL,U,KP,,10,11
DK,ALL,ALL      !Engaste dos arranques dos pilares em todos
                os 6 GL.

ALLSEL,ALL      !Reseta a seleção
LSEL,S,LOC,Z,0  !Seleciona as linhas da base do núcleo
DL,ALL,,ALL     !Engaste dos arranque do núcleo em todos
                os 6 GL.

!DIREÇÃO DO PESO PRÓPRIO
ACEL,0,0,9.8    !Define a aceleração da gravidade local
                como 9.8 no eixo z

!RESOLVE O SISTEMA DE EQUAÇÕES
SOLVE

/POST1          !Entra no modo de pós-processamento

!MASSA TOTAL DA ESTRUTURA
*GET,MASSA_TOTAL,ELEM,0,MTOT,Z !Captura a massa total
                               do modelo [kg]

!SALVA A MASSA DA ESTRUTURA
*CFOPEN,MASSA,out
*VWRITE,MASSA_TOTAL
(F16.4)
*CFCLOSE

!CAPTURA AS FREQ. NATURAIS [(2)FLEXÃO EM X (3)TORÇÃO EM Z]
*DIM,FREQS,ARRAY,2,1          !Cria um array com as duas
                               frequências naturais
*GET,FREQS(1),MODE,2,freq     !Captura a frequência

```

```

de flexão em x
*GET,FREQS(2),MODE,3,freq !Captura a frequência
de torção em z

!CRIAR OS ARRAYS CONTENDO AS INFORMAÇÕES DA FORMA MODAL
*DIM,NOPAV,ARRAY,npav,16 !Cria um array com os 16KP por
pavimento
*DIM,MODAL_SHAPE,ARRAY,npav,16 !Cria um array com a forma modal
em x dos 16KP por pavimento
*DIM,MEAN_MODAL_SHAPE,ARRAY,npav,1 !Cria um array com a média da
forma modal por pavimento

!SELECIONA OS NÓS ASSOCIADOS AOS KEYPOINTS SELECIONADOS
ALLSEL,ALL !Reseta a seleção
*DO,i,1,npav,1
ALLSEL,ALL !Reseta a seleção
KSEL,S,LOC,Z,i*pd !Seleciona os keypoints do pavimento i
NSLK,S !Seleciona os nós associados aos keypoints
*VGET,nosarray,NODE,NoNodes,NLIST,,,,4 !Captura o número dos
nós selecionados num
array(nosarray)

*DO,j,1,16,1
NOPAV(i,j)=nosarray(j) !Organiza os nós por pavimento
numa matriz

*ENDDO
*ENDDO

!OBTÉM A MÉDIA DA FORMA MODAL DE FLEXÃO EM X POR PAVIMENTO
ALLSEL,ALL !Reseta a seleção
SET,1,2 !Forma modal de flexão em x
*DO,i,1,npav,1
*DO,j,1,16,1
!Captura os deslocamentos em x de cada nó
MODAL_SHAPE(i,j)=UX(NOPAV(i,j))
!Somatório dos deslocamentos
MEAN_MODAL_SHAPE(i)=MEAN_MODAL_SHAPE(i)+MODAL_SHAPE(i,j)
*ENDDO
!Média da forma modal - Direção x

```

```

      MEAN_MODAL_SHAPE (i) = MEAN_MODAL_SHAPE (i) / 16
*ENDDO

!SALVA AS FREQUÊNCIAS NATURAIS
*CFOPEN, freqnat, out
*VWRITE, FREQS (1,1)
(F16.5)
*CFCLOSE

FINISH !Finaliza a análise

/SOLU      !Entra no modo de solução
ANTYPE,static      !Análise estática

!CÁLCULO DO VENTO DINÂMICO (NBR6123/88 - CAP. 9) MÉTODO DISCRETO
V0=46          !Velocidade básica do vento [m/s]
S1=1          !Fator topográfico [adm]
S3=1          !Fator probabilístico [adm]
Vp=0.69*V0*S1*S3 !Velocidade de projeto - Tr=10min [m/s]
q0=0.613*Vp**2 !Pressão média [N/m²]
Ca=1.1        !Coef. de arrasto alta turbulência [adm]
zref=10       !Altura de referência [m]
p=0.31        !Fator potencial [adm]
b=0.5         !Parâmetro meteorológico [adm]
theta=0       !Angulo de incidência do vento em relação ao
              eixo x [rad]
Avento_c_x=pd*(Lx1/2) !Área de influência nos nós de canto
                  direção x [m²]
Avento_m_x=pd*(Lx1/2+Lx2/2) !Área de influência nos nós do
                  meio direção x [m²]
Avento_c_y=pd*(Ly1/2) !Área de influência nos nós de canto
                  direção y [m²]
Avento_m_y=pd*(Ly1/2+Ly2/2) !Área de influência nos nós
                  do meio direção y [m²]

!CALCULO DA PARCELA FLUTUANTE
m0=MASSA_TOTAL !Estimativa do peso total da estrutura [KN]
              (Massa discreta de referência)
mi=MASSA_TOTAL/npav !Estimativa do peso por pavimento [KN]

```

```

(Massa discreta da coordenada i)
Psi_i=mi/m0 !Relação entre o peso do pavimento e o total [adm]
A0=(npav*pd)*(2*Ly1+Ly2) !Área de referência [m²]

!CALCULO DO COEFICIENTE DE AMPLIFICAÇÃO DINÂMICA
L_ref=1800 !Altura gradiente (Dimensão característica) [m]
AUX1=Vp/(FREQS(1)*L_ref)
!l1/h=0 - Coef.Amortecimento=2%
!Coeficiente de amplificação dinâmica h=100m [adm]
Ksi0_100=-55.849*(AUX1**2)+15.428*AUX1+1.0552

!Coeficiente de amplificação dinâmica h=300m [adm]
Ksi0_300=-57.895*(AUX1**2)+12.352*AUX1+0.5661

!Coeficiente de amplificação dinâmica h=280m [adm]
Ksi0_280=Ksi0_100+(Ksi0_300-Ksi0_100)*((npav*pd-100)/200)

!l1/h>=0.2 - Coef.Amortecimento=2%
!Coeficiente de amplificação dinâmica h=100m [adm]
Ksi1_100=-44.859*(AUX1**2)+11.404*AUX1+0.9314

!Coeficiente de amplificação dinâmica h=300m [adm]
Ksi1_300=-31.547*(AUX1**2)+6.8008*AUX1+0.4945

!Coeficiente de amplificação dinâmica h=280m [adm]
Ksi1_280=Ksi1_100+(Ksi1_300-Ksi1_100)*((npav*pd-100)/200)

!l1/h=real - Coef.Amortecimento=2%
l1_h=(2*Ly1+Ly2)/(npav*pd) !Relação l1/h [adm]
!Coeficiente de amplificação dinâmica h=280m [adm]
Ksi=Ksi0_280+(Ksi1_280-Ksi0_280)*(l1_h/0.2)

SUM_Betai_Xi=0
SUM_Psi_Xi=0
*DO, j, 1, npav
  zi=pd*i
  factor=1.0 !Multiplicador da altura
  *IF, j, EQ, 1, THEN
    factor=1.5 !Multiplicador da altura (BASE DO EDICÍFIO)

```

```

*ENDIF
*IF, j, EQ, npav, THEN
    factor=0.5      !Multiplicador da altura (TOPO DO EDICÍFIO)
*ENDIF

    Beta_i_aux_c1=Ca*((factor*Avento_c_x)/A0)*
((zi/zref)**p)*MEAN_MODAL_SHAPE(j)
    Beta_i_aux_m1=Ca*((factor*Avento_m_x)/A0)*
((zi/zref)**p)*MEAN_MODAL_SHAPE(j)
    Beta_i_aux_m2=Ca*((factor*Avento_m_x)/A0)*
((zi/zref)**p)*MEAN_MODAL_SHAPE(j)
    Beta_i_aux_c2=Ca*((factor*Avento_c_x)/A0)*
((zi/zref)**p)*MEAN_MODAL_SHAPE(j)
    SUM_Betai_Xi=SUM_Betai_Xi+Beta_i_aux_c1+Beta_i_aux_m1+
Beta_i_aux_m2+Beta_i_aux_c2

    SUM_Psi_Xi=SUM_Psi_Xi+Psi_i*(MEAN_MODAL_SHAPE(j)**2)
*ENDDO

FH=q0*(b**2)*A0*(SUM_Betai_Xi/SUM_Psi_Xi)*Ksi !Força horizontal
                                                de referência
*DIM, DELOCMAX, ARRAY, 2  !Cria um array para armazenar
                           os deslocamentos máximos

*DO, j, 1, 2
    *DO, i, 1, npav
        zi=pd*i
        pressao_med=q0*(b**2)*Ca*((zi/zref)**(2*p))
        F_flut=FH*Psi_i*MEAN_MODAL_SHAPE(i)

        factor=1.0      !Mult. da altura
    *IF, i, EQ, 1, THEN
        factor=1.5 !Mult. da altura (BASE DO EDICÍFIO)
    *ENDIF
    *IF, i, EQ, npav, THEN
        factor=0.5 !Mult. da altura (TOPO DO EDICÍFIO)
    *ENDIF

    !Aplica somente a força de vento correspondente a

```

```

parcela flutuante (CASO DE CARGA 1)
*IF, j, EQ, 1, THEN
    !Forças na face edifício em y (aparecem em x)
    fk, 16*(i)+1, FX, (F_flut/4)*COS(theta) !Kp de canto
    fk, 16*(i)+5, FX, (F_flut/4)*COS(theta) !Kp de meio
    fk, 16*(i)+9, FX, (F_flut/4)*COS(theta) !Kp de meio
    fk, 16*(i)+13, FX, (F_flut/4)*COS(theta) !Kp de canto

    !Forças na face edifício em x (aparecem em y)
    fk, 16*(i)+1, FY, (F_flut/4)*SIN(theta) !Kp de canto
    fk, 16*(i)+2, FY, (F_flut/4)*SIN(theta) !Kp de meio
    fk, 16*(i)+3, FY, (F_flut/4)*SIN(theta) !Kp de meio
    fk, 16*(i)+4, FY, +(F_flut/4)*SIN(theta) !Kp de canto

*ENDIF
!Aplica a força de vento correspondente a parcela média
e flutuante (CASO DE CARGA 2)
*IF, j, EQ, 2, THEN
    !Forças na face edifício em y (aparecem em x)
    fk, 16*(i)+1, FX, ((factor*pressao_med*Avento_c_x)+
(F_flut/4))*COS(theta) !Kp de canto
    fk, 16*(i)+5, FX, ((factor*pressao_med*Avento_m_x)+
(F_flut/4))*COS(theta) !Kp de meio
    fk, 16*(i)+9, FX, ((factor*pressao_med*Avento_m_x)+
(F_flut/4))*COS(theta) !Kp de meio
    fk, 16*(i)+13, FX, ((factor*pressao_med*Avento_c_x)+
(F_flut/4))*COS(theta) !Kp de canto

    !Forças na face edifício em x (aparecem em y)
    fk, 16*(i)+1, FY, ((factor*pressao_med*Avento_c_y)+
(F_flut/4))*SIN(theta) !Kp de canto
    fk, 16*(i)+2, FY, ((factor*pressao_med*Avento_m_y)+
(F_flut/4))*SIN(theta) !Kp de meio
    fk, 16*(i)+3, FY, ((factor*pressao_med*Avento_m_y)+
(F_flut/4))*SIN(theta) !Kp de meio
    fk, 16*(i)+4, FY, ((factor*pressao_med*Avento_c_y)+
(F_flut/4))*SIN(theta) !Kp de canto
*ENDIF
*ENDDO

```

```

        LSWRITE, j          !Salva o caso de carga
*ENDDO

!RESOLVE O SISTEMA DE EQUAÇÕES
LSSOLVE, 1, 2           !Resolve ambos casos de carga

/POST1                  !Entra no modo de pós-processamento

!CAPTURA OS DESLOCAMENTOS MÁXIMOS PARA CADA CASO DE CARGA
*DO, i, 1, 2
    !CAPTURA O DESLOCAMENTO MÁXIMO
    SET, i               !Abre o caso de carga específico
    NSORT, U, SUM, , 1 !Pega a soma dos deslocamentos absolutos
    *GET, DELOCMAX(i), SORT, , MAX !Guarda na variável DELOCMAX
                                o deslocamento absoluto máximo
*ENDDO

!SALVA AMBOS OS DESLOCAMENTOS MÁXIMOS
*CFOPEN, outpor, out
*VWRITE, DELOCMAX(1, 1)
(F16.7)
*CFCLOSE

!CAPTURA OS NÓS DA BASE DO NÚCLEO
ndiv_nucleo=5
nnos_nucleo=ndiv_nucleo*4
*DIM, NOREACT, ARRAY, nnos_nucleo, 1 !Cria um array com os nós
                                        de canto do SHEAR-WALL
NOREACT(1)=NODE(Lx1, Ly1, 0), NODE(Lx1+Lx2, Ly1, 0),
NODE(Lx1, Ly1+Ly2, 0), NODE(Lx1+Lx2, Ly1+Ly2, 0) !Nós de canto
                                                no núcleo
*DO, i, 1, ndiv_nucleo-1, 1 !Nós ao redor do núcleo
    NOREACT(i+ndiv_nucleo-1)=NODE(Lx1, Ly1+i*(Ly2/ndiv_nucleo), 0)
    NOREACT(i+(ndiv_nucleo-1)*2)=NODE(Lx1+Lx2, Ly1+i*
(Ly2/ndiv_nucleo), 0)
    NOREACT(i+(ndiv_nucleo-1)*3)=NODE(Lx1+i*
(Lx2/ndiv_nucleo), Ly1, 0)
    NOREACT(i+(ndiv_nucleo-1)*4)=NODE(Lx1+i*
(Lx2/ndiv_nucleo), Ly1+Ly2, 0)

```

```
*ENDDO
```

```
!CAPTURA AS REAÇÕES EM TORNO DO NÚCLEO RÍGIDO
```

```
*DIM, REACT, ARRAY, nnos_nucleo, 3 !Cria um array com as reações
```

```
*DO, i, 1, nnos_nucleo, 1
```

```
    *GET, REACT(i, 1), NODE, NOREACT(i, 1), RF, FZ
```

```
    *GET, REACT(i, 2), NODE, NOREACT(i, 1), RF, MY
```

```
    *GET, REACT(i, 3), NODE, NOREACT(i, 1), RF, MX
```

```
*ENDDO
```

```
!SALVA AS REAÇÕES EM TORNO DO NÚCLEO RÍGIDO
```

```
*CFOPEN, outputreact, out
```

```
*VWRITE, REACT(1, 1), REACT(1, 2), REACT(1, 3)
```

```
(E19.13, ' ', E19.13, ' ', E19.13)
```

```
*CFCLOS
```

```
FINISH          !Finaliza a análise
```