

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

OTIMIZAÇÃO DE PÓRTICOS DE AÇO E AMORTECEDORES VISCOSOS SOB
EXCITAÇÃO SÍSMICA

por

Cristian Berastegui Barranco

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Março de 2020.

OTIMIZAÇÃO DE PÓRTICOS DE AÇO E AMORTECEDORES VISCOSOS SOB
EXCITAÇÃO SÍSMICA

por

Cristian Berastegui Barranco
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof^{ra}. Dr^a. Letícia Fleck Fadel Miguel

Co-Orientador: Prof. Dr. Jesús Daniel Villalba Morales

Aprovada por:

Prof. Dr. Orlando Cundumi Sánchez, PUJ - Cali

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz, PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Edson Hikaro Aseka, DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Daniel Milbrath de Leon, DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 13 de Março de 2020.

Á Deus. Aos meus pais e irmãos

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus principalmente por me encher de vida e saúde, para me desenvolver como profissional e como pessoa.

Agradeço especialmente à professora e orientadora, Letícia Fleck Fadel Miguel, pelo acompanhamento, pelo conhecimento transmitido e pelo constante apoio no desenvolvimento de todo esse processo.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

O projeto estrutural otimizado é uma área relativamente nova que teve avanços importantes na última década. Seu objetivo geral, normalmente, é minimizar o peso ou o custo das estruturas projetadas, levando em consideração as condições mínimas necessários para garantir a durabilidade e bom funcionamento destas. Para estruturas submetidas à excitação sísmica, um dos aspectos mais importantes é a limitação dos deslocamentos relativos entre andares (*drift*). Para controlar e reduzir as amplitudes de vibração geradas pelos sismos, podem ser instalados nas estruturas dispositivos passivos de dissipação de energia tais como amortecedores viscosos. Como grande vantagem, os sistemas de controle passivos não requerem fontes externas de energia. Os amortecedores viscosos são compactos e fáceis de instalar, além disso seus custos de manutenção são baixos em relação a outros dispositivos. Neste contexto, este trabalho visa propor uma metodologia para obtenção do projeto ótimo de pórticos planos de aço resistentes à carga sísmica equipados com amortecedores viscosos otimizados (amortecimento ótimo). Inicialmente é realizado o projeto de um pórtico sob carga sísmica sem levar em consideração a limitação de deslocamento relativo para depois fazer controle da resposta dinâmica adicionando e otimizando amortecedores viscosos em cada andar do pórtico. O presente trabalho foi desenvolvido seguindo as considerações das *Specification for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 360-16, 2016* (chamado daqui em diante neste trabalho como especificações ANSI/AISC 360-16), as *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 341-16, 2016* (que vão ser chamadas neste documento como disposições ANSI/AISC 341-16) e o *Manual of Steel Construction, Load & Resistance Factor Design LRFD - AISC, 1986* (o qual vai ser chamado como manual LRFD – AISC). A otimização do pórtico na primeira fase teve como objetivo minimizar a massa da estrutura e a otimização dos amortecedores na segunda fase foi feita com o objetivo de diminuir o *drift* até que as especificações fornecidas pelas normas fossem respeitadas. Para resolver os problemas de otimização levantados aqui foi usado um algoritmo *Differential Evolution* (DE) determinístico com o intuito de evitar a necessidade de definição manual dos parâmetros que configuram o algoritmo de otimização, além de melhorar e agilizar o processo de busca. Os processos de otimização (pórtico e amortecedores) e o projeto da estrutura foram realizados através de rotinas computacionais desenvolvidas no *software MatLab* e a análise estrutural dinâmica foi realizada no *software OpenSees*. O desenvolvimento completo do trabalho foi realizado vinculando ambos os *softwares*. Os resultados do estudo demonstraram que, a fim de respeitar a restrição do

drift de $\frac{h}{400}$ estabelecida pela norma, foi possível diminuir em mais de 67% o *drift* máximo do pórtico sob uma carga sísmica, assim como também foi diminuído em mais de 59% o deslocamento no topo da estrutura. Além disso, foi determinada que a economia de material oferecida pelo uso de amortecedores viscosos para o desenvolvimento de uma estrutura resistente à carga sísmica em relação a uma estrutura sismo-resistente sem o uso de amortecedores é de aproximadamente 70%.

Palavras-chaves: Amortecedor Viscoso; Otimização Estrutural; Algoritmo; *Differential Evolution*; Sismo; Meta-heurístico; OpenSees.

ABSTRACT

Structural design is a relatively new area that has progressed significantly in the last decade. Generally, its objective is to minimize the weight or cost of the designed structures, taking into account the minimum aspects necessary to ensure their durability and proper operation. For structures subjected to seismic loading, one of the most important aspects is the limitation of induced displacements to the structure (drift or maximum displacement) due to earthquakes. To control and reduce the amplitudes of vibration generated by earthquakes, passive energy dissipation devices can be used as shock absorbers in the structures. As a great advantage, passive control systems do not require external power supplies for activation. Viscous shock absorbers are compact and easy to install, and their maintenance costs are low compared to other devices. Consequently, this work aims to propose a method to obtain the optimal design of seismic load-resistant flat steel frames equipped with optimized viscous shock absorbers (optimum capacity). Initially, and as a first phase, the design of a steel frame under seismic load is carried out without taking into account the limitation of displacement (drift for this work) and then, as a second phase, control the dynamic response by adding and optimizing viscous shock absorbers on each floor of the structure. This work has been developed following the ANSI / AISC 360-16 specifications, the ANSI / AISC 341-16 provisions and the LRFD-AISC manual. The optimization of the steel frame in the first phase was to minimize the mass of the structure. The optimization of the shock absorbers in the second phase was carried out to reduce drift until the specifications provided by the regulations are met. To solve the optimization problems raised here, an adaptive Differential Evolution (DE) algorithm was used to avoid the need to manually define the parameters that configure the optimization algorithm, as well as to improve and accelerate the search process. Optimization processes (steel frames and shock absorbers) and the structure design were performed with MatLab software and the dynamic structural analysis was performed with OpenSees software. The complete development of the work was achieved by linking both software. The results of the study showed that, in order to comply with the $h / 400$ drift restriction established by the standard, it was possible to reduce the maximum drift of the steel frame under seismic load by more than 67%, as well as it was possible to decrease by more than 59% the displacement at the top of the structure. In addition, it has been determined that the material savings offered by the use of viscous shock absorbers for the development of a structure resistant to seismic load with respect to an earthquake-resistant structure without the use of shock absorbers is approximately 70%.

Keywords: Viscous Damper; Structural Optimization; Algorithm; Differential Evolution; Earthquake; Metaheuristic; OpenSees.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Noções Básicas de Otimização.....	4
2.1.1	Variáveis de Projeto	4
2.1.2	Função Objetivo	4
2.1.3	Restrições	4
2.2	Algoritmos Meta-heurísticos	5
2.2.1	Algoritmo de Evolução Diferencial (<i>Differential Evolution</i> – DE)	7
2.3	Ações Dinâmicas em Estruturas.....	10
2.4	Sistemas de Controle Estrutural	11
2.4.1	Sistemas de Controle Ativo	11
2.4.2	Sistemas de Controle Semiativos	12
2.4.3	Sistemas de Controle Híbridos	12
2.4.4	Sistemas de Controle Passivo.....	13
2.5	Amortecedores viscosos	16
2.6	OpenSees	21
3	METODOLOGIA PROPOSTA.....	23
3.1	Otimização do Pórtico de Aço.....	24
3.1.1	Variáveis e Parâmetros de Projeto.....	24
3.1.2	Função Objetivo	26
3.1.3	Restrições de Projeto	26
3.1.4	Função de penalização.....	31
3.2	Otimização de amortecedores	33
3.2.1	Variáveis e parâmetros de projeto	34
3.2.2	Função objetivo	34
3.3	Algoritmo de evolução diferencial (DE)	35
3.3.1	Inicialização.....	36
3.3.2	Mutação	37

3.3.3	Crossover.....	37
3.3.4	Seleção.....	38
3.4	OpenSees	40
4	EXEMPLO ILUSTRATIVO: RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
4.1	Estrutura a Analisar	45
4.2	Fase 1: Otimização do Pórtico de Aço	48
4.3	Fase 2: Otimização de Amortecedores Viscosos	50
4.4	Resultados	52
5	CONCLUSÕES	64
5.1	Conclusões Finais.....	64
5.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros.....	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	(a) Estrutura de 105 elementos; (b) Estrutura de 568 elementos. [Adaptada de Carbas, 2016].....	9
Figura 2.2	Variação no melhor projeto com o <i>Firefly</i> melhorado (EFFA) e o <i>Firefly</i> padrão (FFA): (a) Exemplo de estrutura de 105 elementos; (b) Exemplo de estrutura de 568 elementos. [Adaptada de Carbas, 2016]	9
Figura 2.3	Diagrama esquemático do controle ativo. [Borges, 2009].....	12
Figura 2.4	Modelo de um sistema de controle híbrido de AMH. [Borges, 2009].....	13
Figura 2.5	Efeito sísmico em um edifício com isolamento de base. [Adaptada de Romo, 2012].....	14
Figura 2.6	Configuração básica de uma estrutura com sistema de controle por dissipação de energia. [Adaptada de Romo, 2012]	15
Figura 2.7	Amortecedor viscoso. [Adaptado de Martínez, 2012]	17
Figura 2.8	Gráfico de força versus velocidade para alguns valores do coeficiente de velocidade α . [Adaptada de Lee e Taylor, 2001].....	18
Figura 2.9	Formas de montagem de amortecedores viscosos em estruturas; a) Com suporte chevrom; b) Com suporte diagonal; c) Combinação de suporte chevrom e diagonal. [Adaptada de Romo, 2012]	18
Figura 2.10	Exemplos comerciais de amortecedores viscosos; a) Amortecedor HiDAM da empresa Kajima Corporation ; b) Amortecedor de fluido viscoso Taylor Devices Inc. [Adaptada de Romo, 2012].....	19
Figura 3.1	Fluxograma da metodologia trabalhada.....	24
Figura 3.2	Representação das variáveis de projeto para a otimização de pórticos de aço. .	25
Figura 3.3	Representação do deslocamento relativo em um pórtico sob carga sísmica em relação ao conceito SC/WB; (a) Deslocamento relativo sobre um andar em um pórtico sem a consideração de SC/WB; (b) Deslocamento relativo uniforme em um pórtico considerando SC/WB. [Adaptado de Moehle et al., 2008].....	29
Figura 3.4	Posição dos amortecedores viscosos no pórtico de aço.	33
Figura 3.5	Etapas básicas do DE. [Adaptada de Karaboga e Gkelem,2004]	36
Figura 3.6	Ilustração do processo da operação de crossover. [Adaptado de Storn e Price, 2007].....	38

Figura 3.7	Pseudocódigo do algoritmo <i>Differential Evolution</i> DE/rand/1. [Adaptado de Pantoja et al., 2015]	39
Figura 3.8	Esquema do Maxwell model. Fonte: Manual do Taylor Devices.....	41
Figura 3.9	Componente de rigidez do amortecedor viscoso modelado com o <i>Maxwell model</i>	41
Figura 3.10	Diagrama esquemático do processo de otimização do pórtico de aço (primeira fase).	43
Figura 3.11	Diagrama esquemático do processo de otimização de amortecedores viscosos (segunda fase).	44
Figura 4.1	Pórtico analisado.	45
Figura 4.2	O sismo El Centro.	47
Figura 4.3	Representação dos conjuntos de variáveis de projeto para otimizar o pórtico de aço.....	48
Figura 4.4	Representação das variáveis de projeto para otimizar os amortecedores viscosos.....	51
Figura 4.5	Pórtico de aço otimizado sob carga sísmica sem controle de deslocamentos....	53
Figura 4.6	Gráfico de convergência para a otimização do pórtico de aço.....	55
Figura 4.7	Gráfico de convergência para a otimização dos amortecedores viscosos.....	55
Figura 4.8	Diagrama de <i>drift</i> máximo para pórtico de 7 andares sem amortecedores (curva vermelha) e equipado com amortecedores viscosos (curva azul).....	56
Figura 4.9	<i>Drift</i> no terceiro andar da estrutura sem amortecedores (curva amarela) e com amortecedores viscosos otimizados (curva preta).	57
Figura 4.10	Comparação em termos de <i>drift</i> máximo por andar entre o pórtico equipado com amortecedores otimizados (curva azul) e o mesmo pórtico com valores de amortecimento mais altos (curva verde).....	59
Figura 4.11	Resposta da estrutura em termos do deslocamento máximo por cada andar sem amortecedores (curva azul) e com amortecedores viscosos (curva preta).....	60
Figura 4.12	Aceleração por cada andar dos pórticos resistentes à carga sísmica usando amortecedores viscosos (curva azul) e sem o uso de amortecedores (curva verde).....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Banco de dados de perfis estruturais W.....	49
Tabela 4.2	Parâmetros de entrada do algoritmo DE para otimização do pórtico de aço.....	50
Tabela 4.3	Parâmetros de entrada do algoritmo DE para otimização dos amortecedores viscosos na estrutura.....	52
Tabela 4.4	Resultado da otimização e perfis resultantes para os membros do pórtico de aço.....	53
Tabela 4.5	Resultado da otimização dos amortecedores viscosos.....	54
Tabela 4.6	Resposta do pórtico de 7 andares em termos de <i>drift</i> sob o sismo El Centro....	57
Tabela 4.7	Valores ótimos e de teste da constante de amortecimento dos amortecedores por cada andar do pórtico de 7 andares.....	58
Tabela 4.8	Resposta do pórtico e 7 andares em termos do deslocamento máximo por cada andar do pórtico submetido ao sismo El Centro.....	60
Tabela 4.9	Resultado da otimização do pórtico de aço com a restrição de drift.....	61
Tabela 4.10	Resultados comparativos entre o pórtico resistente à carga sísmica com amortecedores viscosos e sem amortecedores.....	62
Tabela 4.11	Aceleração por andar dos pórticos resistentes a carga sísmica com uso de amortecedores viscosos e sem eles.....	63

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

TS	<i>Tabu Search</i>
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search</i>
VNS	<i>Variable Neighborhood Search</i>
GLS	<i>Guided Local Search</i>
ILS	<i>Iterated Local Search</i>
ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
SS	<i>Scatter Search</i>
EAs	<i>Evolutionary Algorithms</i>
DE	<i>Differential Evolution</i>
GA	<i>Genetic Algorithms</i>
PCV	Problema do Caixeiro Viajante
AISC	<i>American Institute of Steel Construction</i>
LRFD	<i>Load & Resistance Factor Design</i>
FFA	<i>Firefly Algorithm</i>
SBO	<i>School-Based Optimization</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
AVS	Sistemas Ativos Variáveis
AMH	Amortecedor de Massa Híbrido
AMS	Amortecedor de Massa Sintonizada
BRB	<i>Buckling – Restrained Brace</i>
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
DDBD	<i>Direct Displacement – Based Design</i>

TOSCA	<i>Tool for Optimisation in Structural and Civil Engineering Analysis</i>
OpenSees	<i>Open System for Earthquake Engineering Simulation</i>
PEER	<i>Pacific Earthquake Engineering Research Center</i>
TCL	<i>Tool Command Language</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
SC/WB	<i>Strong Column/Weak Beam</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

NP	Tamanho da população no algoritmo DE
$x_{i,G}$	Indivíduo i da população NP
$x_{j,i,G}$	Variável de projeto j do indivíduo i
F	Força no amortecedor viscoso, N
c	Constante de amortecimento viscoso, Ns/m
α	Coefficiente de velocidade
\dot{x}	Velocidade relativa no amortecedor viscoso, m/s
x	Vetor de variáveis de projeto
$f_p(x)$	Função objetivo para otimização de pórticos de aço
ρ	Densidade de massa, kg/m ³
L_i	Comprimento do i -ésimo membro do pórtico, m
A_i	Área da seção transversal do i -ésimo membro do pórtico, m ²
N_e	Numero de membros do pórtico
$g_1(x)$	Restrição de deslocamento relativo entre andares (<i>drift</i>)
Δ_{hi}	<i>Drift</i> entre os andares i e $i - 1$, m
h_i	Altura do andar i , m
v_i	Deslocamento do andar i , m
v_{i-1}	Deslocamento do andar $i - 1$, m
$g_2(x)$	Restrição de deflexão em vigas
δ_{vi}	Deflexão na viga i do pórtico, m
L_{vi}	Comprimento da viga i do pórtico, m
$g_3(x)$	Restrição de esbeltez em colunas

L_{ci}	Comprimento efetivo do membro i , m
r_i	Raio de giração do perfil do membro i
K	Fator de comprimento efetivo
$g_4(x)$	Restrição de carga axial e flexão
P_u	Resistência axial requerida, Pa
P_n	Resistência axial disponível, Pa
M_{ux}	Resistência à flexão requerida com relação ao eixo x, Nm
M_{uy}	Resistência à flexão requerida com relação ao eixo y, Nm
M_{nx}	Resistência à flexão disponível com relação ao eixo x, Nm
M_{ny}	Resistência à flexão disponível com relação ao eixo y, Nm
ϕ	Fator de resistência de carga axial
ϕ_b	Fator de resistência à flexão
$g_5(x)$	Restrição SC/WB
$\sum M_{Ci}$	Momento fletor das colunas na junta i , Nm
$\sum M_{Vi}$	Momento fletor das vigas na junta i , Nm
$g_6(x)$	Restrição geométrica
$A_{C i}$	Área da seção transversal da coluna do andar i
$A_{C i-1}$	Área da seção transversal da coluna do andar $i - 1$
W_p	Valor penalizado da função objetivo, kg
W	Valor da função objetivo da otimização, kg
C	Função de violação de restrições
λ	Expoente de penalização
β	Fator de penalização
N_r	Número de restrições

$f_a(x)$	Função objetivo para otimização de amortecedores viscosos
$\Delta_{C,max}$	<i>Drift</i> máximo do pórtico equipado com amortecedores, m
$x_{j,min}$	Limite mínimo da j -ésima variável de projeto
$x_{j,max}$	Limite máximo da j -ésima variável de projeto
$rand_{k,j}[0,1]$	Número aleatório uniformemente distribuído entre 0 e 1
$v_{k,G+1}$	Indivíduo mutante
F	Fator de escala de mutação
$u_{k,G+1}$	Indivíduo de teste
CR	Taxa de crossover
$u_{j,k,G+1}$	j -ésimo elemento do indivíduo de teste
D	Número de variáveis de projeto
j_{rand}	Índice aleatório entre 1 a D
K_c	Rigidez da carcaça do amortecedor
K_s	Rigidez do braço de suporte do amortecedor
K	Rigidez do braço de suporte do modelo final de amortecedor instalado
C_p	Matriz de amortecimento de Rayleigh
M	Matriz de massa do sistema
K	Matriz de rigidez do sistema
ζ	Fator de amortecimento da estrutura
ω_i	i -ésima frequência natural
ω_j	j -ésima frequência natural

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas o projeto estrutural tem sido consideravelmente melhorado, em grande parte, para atender à crescente demanda por estruturas mais leves e com os menores custos possíveis. Em outras palavras, para o desenvolvimento e projeto de estruturas que façam uso razoável dos recursos disponíveis respeitando certas restrições necessárias para garantir sua vida e bom funcionamento, tem sido indispensável o uso da otimização estrutural. A área de otimização estrutural é relativamente nova e vários algoritmos tem sido desenvolvidos com o intuito de resolver problemas onde é necessário obter o máximo ou o mínimo de certos parâmetros, como o peso ou os deslocamentos mínimos de uma estrutura.

Um dos fatores mais importantes na realização de projetos estruturais é o efeito das ações ou cargas dinâmicas nas estruturas. Na realidade, todas as estruturas estão sujeitas a ações dinâmicas, que podem estar associadas à atividade humana, operação de equipamentos e máquinas e, em maior medida, pela ação do vento e sismos. Geralmente essas ações dinâmicas induzem vibrações mecânicas nas estruturas que, se não são controladas, acabam causando danos, como por exemplo, em acabamentos externos e internos, tubulações, redução da vida útil da estrutura e, na pior das hipóteses, levam à estrutura ao colapso. Em resposta à necessidade de atenuar o efeito das vibrações nas estruturas, nas últimas décadas tem sido estudados métodos alternativos de controle muito mais eficientes e seguros do que os métodos convencionais, estes últimos consistem em fazer uso da rigidez e da capacidade de absorção de energia na faixa inelástica da estrutura. Esses novos métodos de dissipação de energia em estruturas consistem em inclusão de dispositivos externos na estrutura, como isoladores e amortecedores para reduzir deformações e esforços. Devido a sua grande versatilidade, os amortecedores tornaram-se uma ferramenta amplamente utilizada no controle de vibrações em estruturas, estes dispositivos modificam as propriedades dinâmicas de amortecimento do sistema para que dissipem a energia de excitação e as vibrações induzidas pela atividade sísmica, por exemplo.

Nos últimos anos, com os avanços tecnológicos em termos de capacidade computacional e desenvolvimento de *software*, foram utilizadas simulações em computador com algoritmos de otimização para otimizar a capacidade de amortecimento e custos dos sistemas de controle, geralmente, minimizando o valor de uma função objetivo relacionada com os deslocamentos da estrutura, custo dos dispositivos de controle, entre outros. Todo esse processo é realizado com a variação de diferentes variáveis, como o número de amortecedores

na estrutura, a posição dos amortecedores, tamanho e capacidade. Diferentes aplicações e variações deste tipo de problemas tem sido objeto de estudo na comunidade científica nas últimas décadas.

Um dos dispositivos de controle que atrai mais atenção e que é objeto de estudo no presente trabalho são os amortecedores viscosos devido a sua grande versatilidade, baixo custo de manutenção e que não são danificados no processo de dissipação de energia.

1.1 Motivação

Uma das principais motivações para a realização deste trabalho é o estudo de áreas relativamente novas da engenharia mecânica, como a otimização estrutural e o controle de vibrações em estruturas. Dentro da área de controle de vibração, existe um grande interesse em estudar o comportamento e as vantagens oferecidas pelo uso de amortecedores viscosos em estruturas sob carga sísmica, pois é um tipo de amortecedor muito versátil e com uma boa capacidade de dissipação de energia.

Quando pretende-se estudar a aplicação de amortecedores viscosos, surge a pergunta sobre quais são os parâmetros ideais de cada amortecedor para obter as respostas desejadas na estrutura. A partir daqui o estudo da união dos conceitos de otimização estrutural e controle de vibrações se torna muito interessante. Além disso, há o fato de que a área de otimização dos sistemas de controle é uma área ainda pouco explorada.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é propor e aplicar um método para obter o projeto ótimo de pórticos planos de aço resistentes à carga sísmica equipados com amortecedores viscosos otimizados. Para atingir esse objetivo geral é necessário completar os seguintes objetivos específicos:

1. Desenvolver uma rotina computacional no *software MatLab* para o dimensionamento e projeto de pórticos de aço;
2. Vincular o *MatLab* com o *software OpenSees* no qual é realizada a análise estrutural dinâmica do pórtico;
3. Implementar o algoritmo de otimização *Differential Evolution* para a otimização do pórtico de aço minimizando sua massa e a otimização dos amortecedores viscosos

adicionados à estrutura para o controle da resposta dinâmica minimizando o *drift* máximo até respeitar a especificação da norma;

4. Otimizar o pórtico de aço usando a rotina para o dimensionamento e otimização em *MatLab* e a análise estrutural em *OpenSees*;
5. Otimizar os amortecedores viscosos no pórtico metálico usando a rotina em *MatLab* vinculada ao *software OpenSees* para a análise dinâmica;
6. Comparar as respostas em termos de *drift* máximo de um pórtico resistente à carga sísmica equipado com amortecedores viscosos com um pórtico resistente à carga sísmica respeitando todas as restrições sem o uso de amortecedores.

1.3 Organização do Trabalho

A presente dissertação possui 5 capítulos, onde o primeiro capítulo se refere à introdução, onde são descritos os objetivos e a motivação do trabalho.

No capítulo 2 são apresentadas a revisão bibliográfica e fundamentação teórica. Neste capítulo são desenvolvidos tópicos relacionados com a otimização estrutural e sistemas de dissipação de energia, além disso também são apresentados trabalhos de outros autores relacionados a esses tópicos.

Posteriormente, no capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, onde são descritas detalhadamente as considerações para a execução dos processos de otimização de pórticos de aço e de amortecedores viscosos instalados nas estruturas, também é apresentado completamente o algoritmo de otimização *Differential Evolution* e finalmente é feita uma descrição da definição dos modelos no *software OpenSees*.

Depois da descrição dos métodos usados, no capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões onde são aplicados todos os conceitos estabelecidos nos capítulos anteriores, através de um exemplo ilustrativo. Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais do trabalho bem como sugestões para continuidade da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Noções Básicas de Otimização

Segundo Haftka e Gürdal, 1992, a otimização concentra-se em alcançar as melhores saídas de uma dada operação, enquanto respeita certas restrições. Os elementos básicos para a formulação de um problema de otimização são os seguintes:

2.1.1 Variáveis de Projeto

Conforme apresentado por Haftka e Gürdal, 1992, quando se fala de otimização, fala-se também de gerar mudanças onde as variáveis de projeto são os parâmetros que podem ser modificados para otimizar um sistema.

Para a otimização estrutural as variáveis de projeto podem ser, por exemplo, o tipo de perfil estrutural ou propriedades da seção transversal dos elementos, propriedades do material, entre outros. As variáveis de projeto podem ser contínuas ou discretas. As variáveis contínuas podem tomar um número infinito de valores em um intervalo dado e as variáveis discretas só podem tomar valores específicos.

2.1.2 Função Objetivo

De acordo com Christensen e Klarbring, 2009, é uma função para classificar os projetos obtidos na otimização. Além disso, segundo Kirsch, 1993, “a função objetivo é aquela cujo valor mínimo (minimização) é procurado no processo de otimização” e para a otimização estrutural geralmente pode representar o peso da estrutura, custo, deslocamento ou qualquer outro critério de projeto.

Haftka e Gürdal, 1992, afirmam que uma otimização com mais de um objetivo é conhecida como otimização multiobjetivo, e com só um objetivo será chamada otimização simples. Em geral, a seleção da função objetivo representa a decisão mais importante de todo o processo de otimização.

2.1.3 Restrições

Segundo Haftka e Gürdal, 1992, as restrições em um processo de otimização podem ser de 3 tipos:

- **Restrições laterais:** são aquelas restrições de limites superior e inferior nas variáveis de projeto, as quais são da forma $x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}$, onde x_i é a variável de projeto com $i = 1, 2, 3, \dots, n$.
- **Restrições de desigualdade:** são as que definem limites superior ou inferior em quantidades que geralmente são as respostas do sistema e são do tipo $C_j(x) \geq 0$, onde C_j é a restrição de desigualdade em função da variável de projeto, com $j = 1, 2, 3 \dots n$. Para a otimização estrutural estas restrições podem representar deslocamentos, esforços ou deformações.
- **Restrições de igualdade:** este tipo de restrição é definido analogamente às restrições de desigualdade e estabelece condições de igualdade em quantidades da forma $C_k(x) = 0$, onde C_k é a restrição de igualdade em função da variável de projeto, com $k = 1, 2, 3 \dots n$.

Em relação ao acima mencionado, Nocedal e Wright, 2006, afirmam que o problema de otimização pode ser escrito da seguinte forma:

$$\text{Min } f(x) \quad \text{sujeito a} \quad \begin{array}{l} C_j(x) \geq 0, \quad j \in \mathcal{E} \\ C_k(x) = 0, \quad j \in \mathcal{T} \end{array}$$

Onde $f(x)$ é a função objetivo em termos da variável de projeto e \mathcal{E} e \mathcal{T} são os conjuntos de índices para restrições de desigualdade e igualdade, respectivamente.

Existe uma grande quantidade de algoritmos para a solução de problemas de otimização, classificados de forma diferente. Segundo Koziel e Yang, 2011, levando em conta o foco e as características do problema de otimização os algoritmos podem ser classificados em determinísticos e meta-heurísticos ou estocásticos. Quando o algoritmo trabalha mecanicamente, sem nenhuma natureza aleatória é chamado determinístico, esse tipo de algoritmo de otimização utiliza a informação das funções e suas derivadas (gradiente). Por outro lado, os algoritmos meta-heurísticos trabalham de maneira aleatória e só precisam dos valores da função objetivo no processo de otimização.

2.2 Algoritmos Meta-heurísticos

Os desenvolvimentos em relação a algoritmos de otimização, nas últimas duas décadas, tendem a usar algoritmos meta-heurísticos. Mais especificamente, pode-se dizer que a maioria

dos algoritmos de otimização mais usados em projeto estrutural na atualidade são do tipo meta-heurístico [Yang, 2010].

Segundo Yang, 2010, todos os algoritmos meta-heurísticos usam de certa maneira compensações de randomização e busca local e afirma que “a randomização fornece uma boa maneira de fugir da busca local para buscar globalmente. Portanto, quase todos os algoritmos meta-heurísticos tendem a ser adequados para a otimização global”.

De acordo com Miguel et al., 2013, devido ao fato de não precisarem informação do gradiente, os algoritmos meta-heurísticos também podem ser aplicados em problemas onde o gradiente é difícil de obter ou simplesmente não existe, conseqüentemente os algoritmos meta-heurísticos podem ser aplicados a funções não uniformes ou descontínuas.

Segundo Alba, 2005, algumas das propriedades fundamentais pelas quais são caracterizados os algoritmos meta-heurísticos são:

- Os algoritmos meta-heurísticos são estratégias que “guiam” o processo de busca com a finalidade de encontrar boas soluções.
- O objetivo destes algoritmos é explorar de um jeito eficiente o espaço de busca para encontrar soluções ótimas ou muito boas (quase ótimas).
- As técnicas que constituem algoritmos meta-heurísticos variam desde processos simples de busca local a processos de aprendizagem complexos.
- Os algoritmos meta-heurísticos são aproximados e geralmente não determinísticos.
- Os algoritmos meta-heurísticos podem incorporar mecanismos para evitar ficar presos em regiões reduzidas do espaço de busca, o seja, para melhorar a exploração do espaço de busca.
- Os conceitos básicos de meta-heurística podem ser aplicados de forma geral (ou seja, não vinculado a um problema específico).
- As meta-heurísticas mais eficientes atualmente usam a experiência de busca como feedback para orientar a busca pelas áreas mais favoráveis.

Conforme apresentado por Yang, 2014, os algoritmos meta-heurísticos podem ser classificados em métodos baseados em trajetória e métodos baseados em população. A expressão “algoritmo baseado em trajetória” é usado porque o processo de busca realizado é caracterizado por determinar uma trajetória no espaço de busca, entre esses métodos destacam-se: busca tabu (*Tabu Search* – TS), Busca adaptativa aleatoriamente gulosa (*Greedy Randomized Adaptive Search* – GRASP), Busca em vizinhança variável (*Variable*

Neighborhood Search – VNS), Busca local guiada (*Guided Local Search* – GLS) e a Busca local iterada (*Iterated Local Search* – ILS).

Os algoritmos baseados em população trabalham em cada iteração com um conjunto de soluções que são conhecidas como população. Assim eles exploram o espaço de busca desde várias regiões ao mesmo tempo e o resultado final depende da forma em que a população é manipulada. Os algoritmos baseados em população mais amplamente estudados são: Otimização de colônia de formigas (*Ant Colony Optimization* – ACO), Otimização por enxames de partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO), Otimização de busca dispersa (*Scatter Search* – SS) e os algoritmos evolutivos (*Evolutionary Algorithms* – EAs), entre os quais encontram-se o algoritmo de evolução diferencial (*Differential Evolution* – DE) e os algoritmos genéticos (*Genetic Algorithms* – GA) [Alfonso et al., 2009].

É importante mencionar que o algoritmo de otimização usado para o desenvolvimento deste trabalho foi o *Differential Evolution*. A seguir apresentam-se algumas generalidades deste.

2.2.1 Algoritmo de Evolução Diferencial (*Differential Evolution* – DE)

O algoritmo DE foi desenvolvido por Rainer Storn e Kenneth Price em 1997, e corresponde a um método estocástico de busca direta baseado em população para a otimização global [Storn, 2008]. O DE adota métodos relacionados com processos biológicos como a mutação, a seleção natural e o cruzamento. Desta forma Storn e Price, 1997, determinaram que o DE usaria uma população de NP indivíduos (soluções candidatas) $\mathbf{x}_{i,G} = \{x_{1,i,G}, x_{2,i,G}, \dots, x_{D,i,G}\} \in S$, com $i = 1, 2, \dots, NP$. Onde S é o espaço de busca do problema e cada $x_{j,i,G}$ corresponde à j -ésima variável de decisão (variável de projeto) do problema, sendo D o número de variáveis de projeto e G indica a geração (iteração) à que pertence o vetor.

Como mencionado acima, o DE foi escolhido para a realização do presente trabalho, por ser uma das técnicas de otimização estocásticas mais eficazes e eficientes e tem apresentado através dos anos uns excelentes resultados ao resolver problemas de otimização complexos, ademais é um método aplicável a uma grande variedade de problemas.

De acordo com Storn e Price, 1997, o DE atende aos requisitos essenciais que precisa uma técnica de otimização para ser considerada prática e confiável, as quais são:

- Capacidade para funções objetivo não diferenciáveis, não lineares e multimodais.

- Paralelismo para enfrentar funções objetivo pesadas, ou seja, para resolver problemas de otimização computacionalmente exigentes onde, por exemplo, uma avaliação da função objetivo pode levar minutos ou horas.
- Facilidade de uso, ou seja, poucas variáveis de controle para gerir o processo de busca (otimização).
- Boas propriedades de convergência, ou seja, convergência constante ao mínimo global.

No Capítulo 3 o método para a aplicação do DE é explicado mais detalhadamente.

Os algoritmos meta-heurísticos têm mostrado um grande desempenho em aplicações de projeto estrutural devido a sua velocidade, paralelismo, versatilidade e capacidade de melhora. Desta maneira esses algoritmos tem sido amplamente usados para o dimensionamento de pórticos de aço. A seguir apresentam-se alguns trabalhos onde são usados algoritmos de otimização meta-heurísticos para o projeto de pórticos de aço.

Camp et al., 2005, usaram o algoritmo *Ant Colony Optimization* (ACO) para o processo de otimização direta de pórticos de aço. O mapeamento do dimensionamento dos pórticos foi realizado usando o problema do caixeiro viajante (PCV). A função objetivo em consideração é o peso total da estrutura sujeita a restrições de serviço e resistência de acordo com as especificações da *American Institute of Steel Construction, Load & Resistance Factor Design* (AISC - LRFD). O método para o projeto de pórticos de aço com ACO foi aplicado a três estruturas diferentes e comparado com projetos desenvolvidos com *Genetic Algorithms* (GA) e métodos clássicos de otimização contínua. Como resultado deste trabalho foi obtido que o ACO é capaz de realizar projetos de pórticos mais leves em menor número de análises em comparação com os projetos GA na literatura.

Com o intuito de melhorar o rendimento do *Firefly Algorithm* (FFA) padrão para evitar o aprisionamento da função objetivo em ótimo locais, em problemas de projeto de pórticos de aço de grande tamanho (estruturas de 105 e 568 elementos), Carbas, 2016, propôs duas novas expressões para os parâmetros de atratividade e randomização. O FFA melhorado foi aplicado a dois exemplos de projeto de tamanho real e seu desempenho foi comparado com o de FFA padrão. A função objetivo usada foi o peso total da estrutura e foram implementadas as restrições de projeto de aço de acordo com o manual LRFD - AISC Os resultados deste estudo mostraram que os projetos obtidos com o FFA melhorado nos dois exemplos são 38% e 25% mais leves, como mostrado na Figura 2.1.

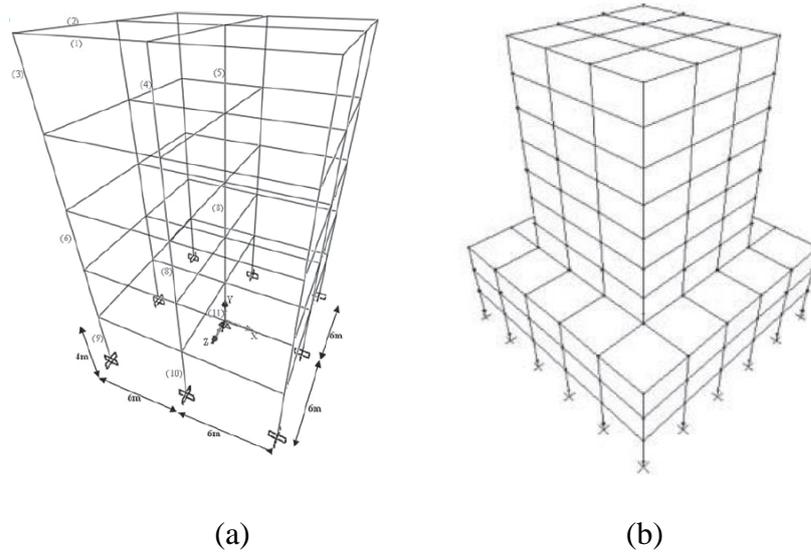


Figura 2.1 - (a) Estrutura de 105 elementos; (b) Estrutura de 568 elementos.
[Adaptada de Carbas, 2016]

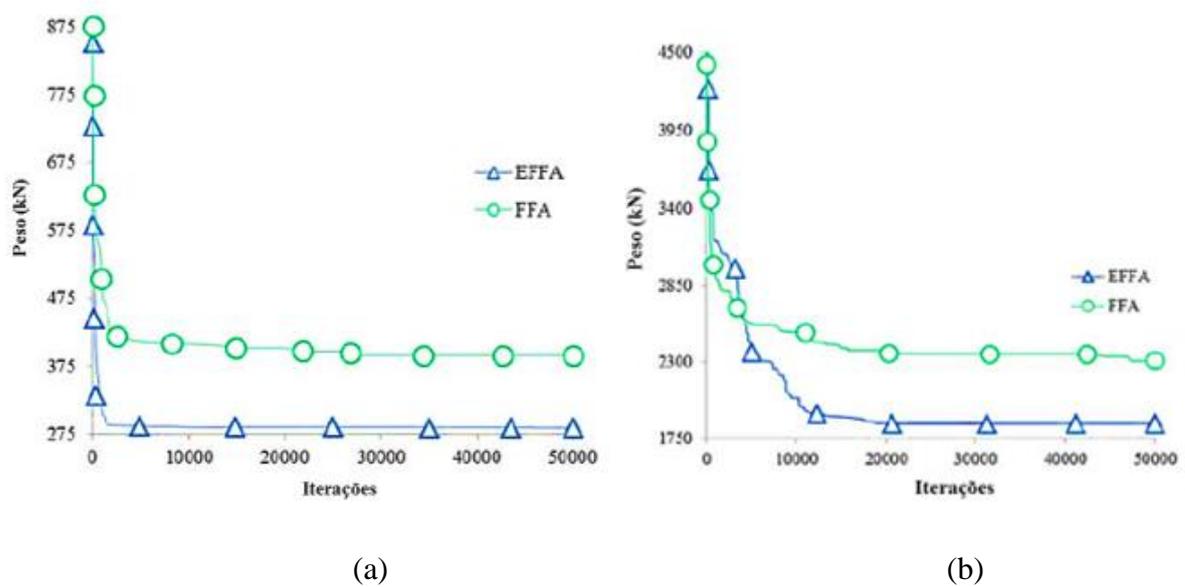


Figura 2.2 - Variação no melhor projeto com o *Firefly* melhorado (EFFA) e o *Firefly* padrão (FFA): (a) Exemplo de estrutura de 105 elementos; (b) Exemplo de estrutura de 568 elementos. [Adaptada de Carbas, 2016]

Farshchin et al., 2018, utilizaram o *School-Based Optimization* (SBO) para o projeto de pórticos de aço com o intuito de minimizar o peso total desses, sujeitos a restrições de força e deslocamento de acordo com a norma (AISC – LRFD). O processo de otimização é aplicado a três problemas de pórticos de aço e os resultados foram comparados com os obtidos com outros métodos de otimização. Os resultados estatísticos indicaram a robustez e desempenho do SOB.

Vu e Wener, 2009, aplicaram o algoritmo *Differential Evolution* (DE) na execução de processos de projeto de estruturas de aço com o intuito de propor projetos ótimos, em relação ao peso, para estruturas de aço desenvolvidas por fabricantes a partir de métodos tradicionais sem otimização usando perfis *Hot-Rolled*. A fim de medir o desempenho do DE, os projetos propostos foram comparados com os projetos desenvolvidos por os fabricantes originais. Os resultados obtidos mostram que em comparação com os métodos tradicionais sem uso de otimização, o método baseado em otimização com o DE resultou ser mais eficiente, obtendo soluções de 9 a 29% melhores que as soluções originais de fabricantes, considerando o peso da estrutura como função objetivo e levando em consideração os critérios de qualidade e eficiência do projeto tradicional.

2.3 Ações Dinâmicas em Estruturas

Um dos fatores mais relevantes na realização de projetos de estruturas é o efeito das ações dinâmicas na estrutura, o que torna essencial o estudo da dinâmica das estruturas.

Segundo Soriano, 2014, as estruturas estão sempre sujeitas a ações externas. Na realidade essas ações geralmente variam com o tempo e são chamadas dinâmicas. Usualmente essas ações dinâmicas são decorrentes de atividade humana (correr, pular e dançar), de equipamentos móveis (como veículos ou pontes rolantes) ou partes móveis (como vibradores, compactadores, turbinas, centrifugadores, entre outros), como também podem ser geradas por ventos, ondas marítimas e sismos.

“Ações externas dinâmicas são idealizadas como determinísticas (definidas analítica ou numericamente em função do tempo) ou como aleatórias, também chamadas ações randômicas (sem valores definidos em cada instante e tratados de forma probabilística). Como essas idealizações, os métodos de análise dinâmica são divididos em determinísticos e probabilísticos. Através dos primeiros, definidas as ações dinâmicas, obtêm-se o comportamento temporal da estrutura. Com os métodos probabilísticos, a partir de informações estatísticas daquelas ações determinam-se características probabilísticas desse comportamento.” [Soriano, 2014].

Ademais Soriano, 2014, define que as ações externas determinísticas podem ser simuladas através de forças dinâmicas equivalentes para obter equações de movimento em semelhança às daquelas ações externas.

2.4 Sistemas de Controle Estrutural

As cargas dinâmicas externas atuando em uma estrutura, geralmente são manifestadas na resposta do sistema como vibrações mecânicas, que se não são controladas poderiam danificar a estrutura e até causar o colapso no caso de fortes sismos.

Segundo Jalili, 2010, os sistemas de controle de vibrações são usados em estruturas com o intuito de eliminar, alterar ou limitar as respostas da estrutura. Nesses sistemas, as forças ou momentos aplicados na estrutura, são alterados para regular ou encontrar uma trajetória desejada (sobre os elementos do sistema de controle) enquanto as vibrações transientes do sistema são suprimidas simultaneamente.

Baseado na norma ISO 3010:2001 Romo, 2012, classifica os sistemas de controle de vibrações como sistemas de controle ativo, semiativo, passivo e híbrido. A seguir apresenta-se um breve resumo desses conceitos, levando em conta que para o presente trabalho foi considerado um sistema de controle passivo de dissipação de energia com amortecedores viscosos.

2.4.1 Sistemas de Controle Ativo

De acordo com Symans e Constantinou, 1999, um sistema de controle ativo pode ser definido como um sistema com um suprimento externo de energia para a alimentação de sensores e atuadores eletro-hidráulicos ou eletromagnéticos que fornecem força de controle à estrutura. Segundo Borges, 2009, esses elementos agem simultaneamente com a excitação para melhorar o comportamento estrutural e melhorar as condições de serviço e aumentar a segurança. Um sistema de controle ativo apresenta a configuração da Figura 2.3. e está constituído por:

- Sensores localizados na estrutura para medir excitações externas e/ou variáveis da resposta estrutural.
- Dispositivos para processar a informação e para calcular as forças de controle necessárias com base em um algoritmo de controle.
- Atuadores, geralmente alimentados por fontes de energia externa para produzir as forças demandadas.

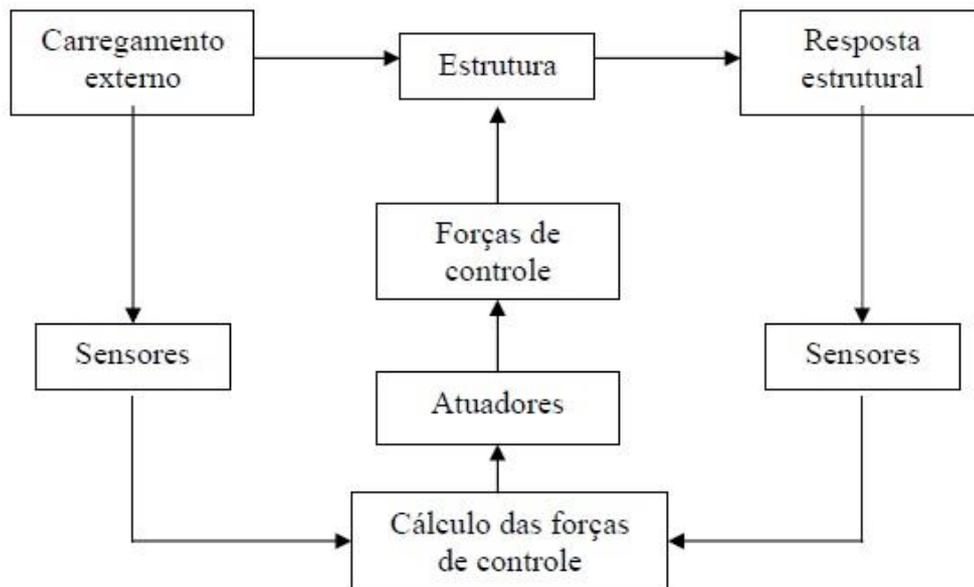


Figura 2.3 - Diagrama esquemático do controle ativo. [Borges, 2009]

2.4.2 Sistemas de Controle Semiativos

Segundo Guilherme, 2011, os sistemas de controle semiativos conseguem adaptar-se às solicitações externas produzindo forças de grande amplitude através da modificação ativa da rigidez ou amortecimento de elementos localizados na estrutura. De acordo com Spencer Jr, 2003, a grande atenção que tem recebido os sistemas semiativos nos últimos anos, pode ser devido ao fato de que esses esquemas oferecem a adaptabilidade dos dispositivos de controle ativos sem precisar de grandes fontes de energia.

Para Ahumada, 2010, os dispositivos semiativos são “dispositivos passivos controlados” e sua grande vantagem no fato de que não conferem forças ao sistema estrutural, o que não permite sua desestabilização.

Um dos dispositivos de controle semiativo mais utilizado é o AVS (Sistemas Ativos Variáveis) que possibilita variar a rigidez da estrutura e por conseguinte as suas frequências naturais [Guilherme, 2011].

2.4.3 Sistemas de Controle Híbridos

Spencer Jr e Soong, 1999, explicam que o termo “controle híbrido” faz referência a um sistema combinado de controle passivo e controle ativo. Neste tipo de sistemas uma parte do

objetivo de controle consegue-se mediante o sistema passivo, assim um esforço menor será exigido por parte do controle ativo, o que implica menos gasto de energia.

Segundo Borges, 2009, este tipo de controle pode ser visto como uma forma alternativa que suprime as principais desvantagens dos controles passivo e ativo isoladamente, como o uso de dispositivos muito robustos de amortecimento e excessivas fontes de energia externa.

Uma das formas mais usadas de controle híbrido é o amortecedor de massa híbrido (AMH), uma combinação de um amortecedor de massa sintonizada (AMS) e um atuador de controle ativo (f) como mostra a Figura 2.4.

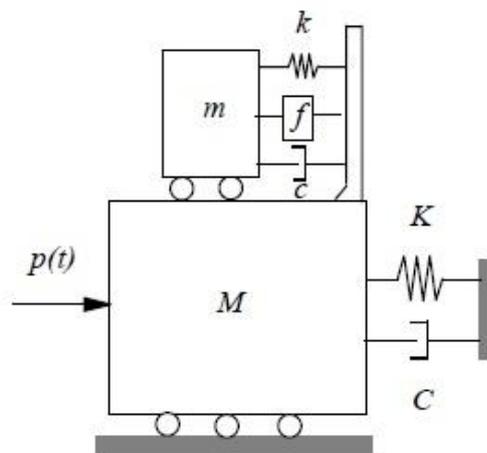


Figura 2.4 - Modelo de um sistema de controle híbrido de AMH. [Borges, 2009]

2.4.4 Sistemas de Controle Passivo

Uma das principais características dos dispositivos passivos de controle é sua grande capacidade de dissipação de energia.

Segundo Romo, 2012, os sistemas de controle passivo absorvem a energia e incrementam o amortecimento da estrutura. Esses sistemas estão constituídos por uma estrutura central com a capacidade de suportar a carga de gravidade e uma série de mecanismos que respondem ao movimento da estrutura, resistindo às forças laterais e dissipando a energia vibratória do sistema estrutural.

Os sistemas de controle passivos podem ser classificados em isoladores de base, amortecedores de efeito de massa e sistemas de dissipação de energia [Romo, 2012].

Dado o foco deste trabalho, será dada ênfase aos sistemas de dissipação de energia com amortecedores viscosos.

2.4.4.1 Isoladores de Base

De acordo com Romo, 2012, o isolamento de base consiste em colocar algum tipo de camada flexível entre a estrutura e os cimentos do edifício. Esses isoladores são caracterizados por ser muito rígidos na direção vertical, mas flexíveis na direção horizontal. Os mais usados são os apoios elastoméricos e os apoios deslizantes. Na Figura 2.5 observa-se o efeito de um sismo em uma estrutura com isolamento de base.



Figura 2.5 - Efeito sísmico em um edifício com isolamento de base. [Adaptada de Romo, 2012]

2.4.4.2 Amortecedores de Efeito de Massa

Segundo Romo, 2012, este tipo de sistema de controle utiliza massa de alta densidade e massa líquida para atenuar os efeitos das vibrações, realizando geralmente um tipo de sintonização entre a ressonância da massa e a estrutura.

Dentro dos dispositivos de efeito de massa encontram-se os amortecedores de massa sintonizada, os quais consistem em uma grande massa acoplada à estrutura mediante uma mola e um amortecedor. O termo “massa sintonizada” surge do processo de calcular a massa para que sua frequência natural de vibração se aproxime à frequência fundamental da estrutura.

2.4.4.3 Sistemas de Controle Passivo com Dissipação de Energia

Os sistemas de controle por dissipação de energia utilizam dispositivos que geralmente aumentam o amortecimento, a rigidez e a capacidade estrutural. Além disso esses sistemas são

muito versáteis devido a poderem ser aplicados em estruturas novas bem como podem ser usados para a reabilitação de estruturas existentes.

Segundo Romo, 2012, os sistemas de dissipação de energia são instalados conectando diferentes nós viga-coluna entre os quais se esperam deslocamentos relativos horizontais importantes como é mostrado na Figura 2.6.

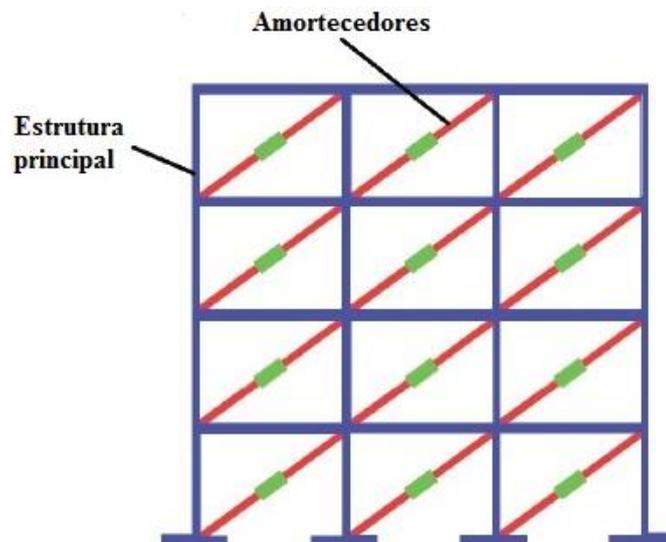


Figura 2.6 - Configuração básica de uma estrutura com sistema de controle por dissipação de energia. [Adaptada de Romo, 2012]

Entre os dispositivos de dissipação de energia mais usados encontram-se os amortecedores viscosos, metálicos e amortecedores por atrito.

Inúmeros estudos têm sido realizados para o desenvolvimento de diferentes tipos de amortecedores, como o realizado por Marshall e Charney, 2010, os quais desenvolveram um amortecedor de controle passivo híbrido constituído por um amortecedor de borracha de alto amortecimento em série com uma braçadeira de flambagem.

- **Amortecedores por atrito**

De acordo com Symans et al., 2008, os amortecedores por atrito dissipam a energia através da interface entre dois corpos sólidos. Alguns projetos de esses amortecedores incluem parafusos estriados onde uma série de placas são parafusadas juntas com uma força especificada. O deslizamento é produzido quando uma força previamente definida no ajuste das placas é atingida.

- **Amortecedores metálicos**

“Este tipo de amortecedor dissipa a energia sísmica em forma de energia térmica e mediante a deformação plástica de metais. Muitos desses dispositivos usam placas de aço com baixa elasticidade, mas outros materiais como o chumbo também têm sido testados com resultados promissores” [Romo, 2012].

Segundo Symans et al., 2008, os dois tipos principais de amortecedores metálicos são os amortecedores BRB (*Buckling – Restrained Brace*) e com uma maior rigidez e amortecimento os amortecedores tipo TADAS.

2.5 Amortecedores viscosos

Os amortecedores do tipo viscoso são dispositivos que dependem da velocidade e não do deslocamento, como consequência disso a rigidez da estrutura não muda e também não são aumentados os esforços nos elementos estruturais.

Inicialmente o uso de dissipadores viscosos era limitado só para aplicações militares como proteger mísseis e submarinos de ataques nucleares e explosões próximas. Com o final da guerra fria em 1990 foi permitida a comercialização para o público em geral para proteger edifícios, pontes e outras estruturas de choques e vibrações destrutivos. Como esta tecnologia era confiável e havia mostrado um bom desempenho através das décadas, a implementação em estruturas comerciais foi realizada rapidamente.

O amortecedor viscoso consiste essencialmente de dois elementos: um cilindro de alta resistência e um pistão, como é mostrado na Figura 2.7. O cilindro contém um fluido de tipo silicone que é resistente ao fogo e estável ante mudanças de temperaturas. O pistão tem no final uma cabeça com pequenos orifícios que divide o interior do cilindro em duas câmaras.

Quando a estrutura é submetida à excitação sísmica, é produzido o deslocamento do pistão dentro do cilindro, esse movimento causa a passagem de fluido de uma câmara a outra e, por sua vez, gera uma pressão diferencial que produz a força de amortecimento.

Devido ao deslocamento interno do pistão, é gerada uma conversão de energia cinética em calor, o que produz a expansão e contração térmica do fluido. Devido a isto, o cilindro contém uma terceira câmara chamada de acumulação, que permite a compensação das variações de volume do fluido [Villarreal e Díaz la Rosa, 2016].

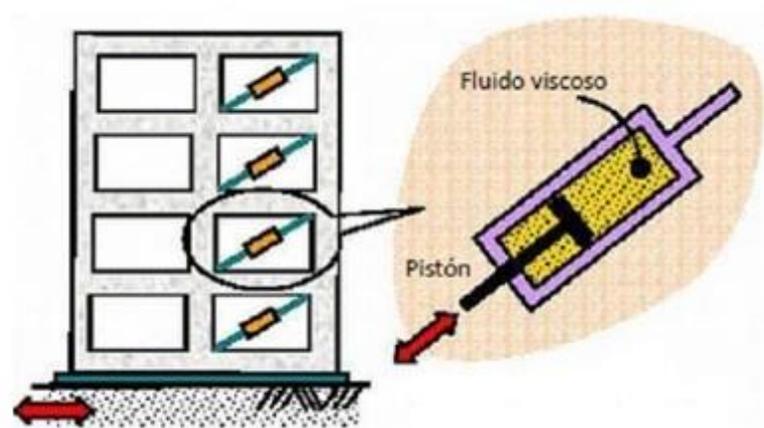


Figura 2.7 - Amortecedor viscoso. [Adaptado de Martínez, 2012]

Como já mencionado, “Durante um sismo, a estrutura experimenta deslocamentos relativos entre os pavimentos, os mesmos que, por sua vez, geram movimentos e acelerações no dispositivo viscoso, onde este regula a passagem do fluido através de pequenos orifícios, a energia sísmica é dissipada tão rápido quanto o fluido circula de uma câmara para outra.”

A equação geral que governa o comportamento dos amortecedores viscosos é:

$$F = c\dot{x}^\alpha \quad (2.1)$$

Onde F é a força do amortecedor, c a constante de amortecimento, \dot{x} a velocidade relativa no amortecedor e α o coeficiente de velocidade que varia entre 0,3 e 1,0 para estruturas. Para amortecedores lineares $\alpha = 1$.

Pode-se ver que não há termo de força de mola na equação. A força do amortecedor varia apenas com a velocidade. Então para uma determinada velocidade a força será a mesma em qualquer ponto do dissipador [Villarreal e Díaz la Rosa, 2016].

A Figura 2.8 mostra o gráfico de força contra velocidade para vários coeficientes de velocidade α em amortecedores viscosos. Um valor de $\alpha = 1$ representa a curva para um amortecedor linear. $\alpha = 0,3$ é o menor coeficiente de velocidade normalmente possível em aplicações estruturais. É observado também na Figura 2.8 como esse valor fornece consideravelmente mais força em velocidades mais baixas que um amortecedor linear. Os

amortecedores estruturais sempre usam valores para α entre 0,3 e 1,0 por causa de que um valor acima de 1,0 oferece um desempenho muito ruim [Lee e Taylor, 2001].

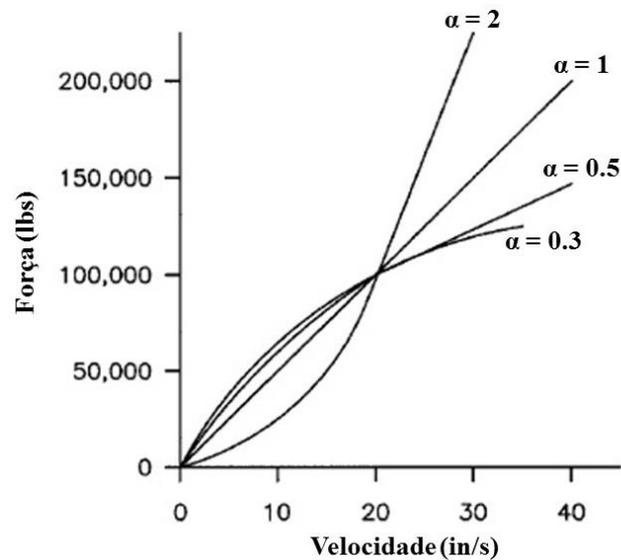


Figura 2.8 - Gráfico de força versus velocidade para alguns valores do coeficiente de velocidade α . [Adaptada de Lee e Taylor, 2001]

Na Figura 2.9 mostram-se algumas das maneiras de montagem de dissipadores viscosos. Na montagem com o suporte chevrom (Figura 2.9 - a) o amortecedor é colocado em posição horizontal. Esse tipo de montagem tem como desvantagem a geração de sobretensão na parte intermediária da viga próxima ao amortecedor. A montagem com suporte diagonal (Figura 2.9 - b) é conhecida por orientar o dispositivo no ângulo diagonal do pórtico. A principal vantagem deste tipo de montagem é que ele não requer nenhum reforço adicional.

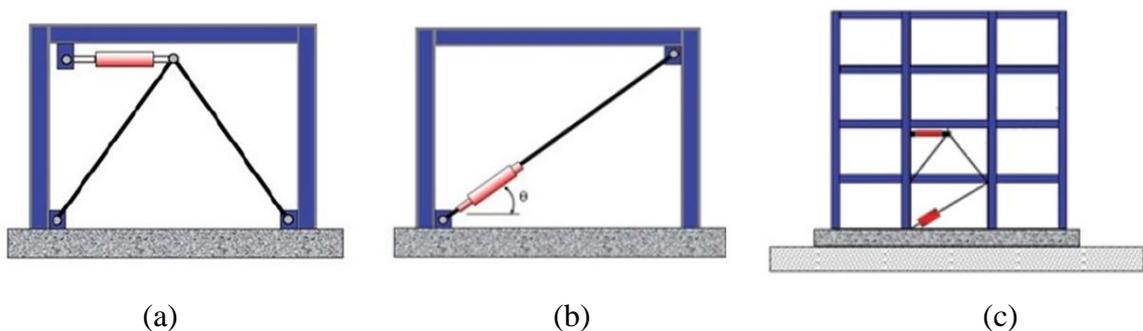


Figura 2.9 - Formas de montagem de amortecedores viscosos em estruturas; a) Com suporte chevrom; b) Com suporte diagonal; c) Combinação de suporte chevrom e diagonal. [Adaptada de Romo, 2012]

Dois dos exemplares comerciais mais populares de amortecedores viscosos são os dispositivos HiDAM e TFDV, mostrados na Figura 2.10.

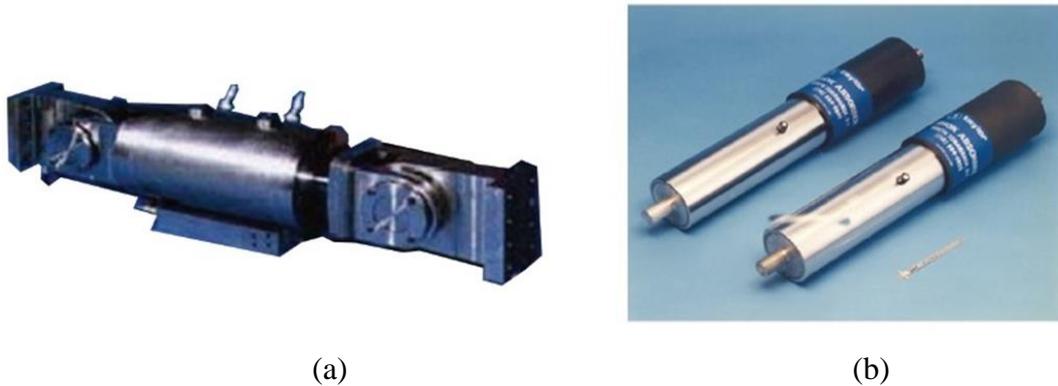


Figura 2.10 - Exemplos comerciais de amortecedores viscosos; a) Amortecedor HiDAM da empresa Kajima Corporation ; b) Amortecedor de fluido viscoso Taylor Devices Inc.

[Adaptada de Romo, 2012]

Inúmeras pesquisas têm sido realizadas em relação à implementação de amortecedores viscosos para o controle dinâmico de estruturas. A seguir alguns desses trabalhos são apresentados.

Martinez-Rodrigo e Romero, 2003, analisaram a resposta dinâmica de um pórtico de aço resistente a momentos de 6 pavimentos submetido a excitação sísmica, equipado com amortecedores viscosos lineares e não lineares. O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo comparativo entre o pórtico de 6 pavimentos com amortecedores lineares e o mesmo pórtico com amortecedores viscosos não lineares. O desempenho sísmico da estrutura dotada com amortecedores viscosos lineares é calculado e comparado com o da estrutura básica (sem amortecedores). Observa-se que, embora seja obtida uma clara melhora, as forças nos amortecedores são extremamente altas. Para tentar reduzir essas forças, busca-se uma solução não linear ótima testando muitas combinações de amortecedores não lineares. Como resultado, verificou-se que as forças axiais nos amortecedores viscosos diminuem enquanto os expoentes de velocidade dos amortecedores não lineares sejam ligeiramente menores que 1. A força máxima experimentada pelos amortecedores no caso não linear pode ser reduzida em mais de 35% em comparação com a modificação linear com desempenho sísmico semelhante.

Com o intuito de analisar a rentabilidade econômica e o desempenho da aplicação de amortecedores viscosos no controle de estruturas, McNamara e Taylor, 2003, aplicaram um

sistema de controle com amortecedores viscosos em uma grande estrutura para reduzir as acelerações iniciais induzidas pelo vento. O sistema é aplicado em uma estrutura de 39 pavimentos e está constituído por amortecedores diretos em uma direção e amortecedores acoplados com um sistema de amplificação de movimento na direção perpendicular.

Por causa de que durante a ação de sismos de grande intensidade a resistência sísmica de amortecedores viscosos pode exceder sua capacidade, Sepehri et al., 2019, propuseram um procedimento para mitigar os danos causados por terremotos graves. Para avaliar o procedimento foram projetados vários pórticos resistentes a momento com vários pavimentos usando 3 métodos: o procedimento proposto, as disposições da ASCE 7 e um procedimento proposto por Miyamoto et al., 2010. O objetivo fundamental do processo proposto é adiar o aparecimento do estado limite (falha no dispositivo devido a deslocamento ou velocidade excessivos) em amortecedores viscosos. Para adiar os danos nos dispositivos, o amortecimento de saída dos amortecedores viscosos em altas velocidades devem ser compensados. Para isso Miyamoto et al., 2010 recomenda o uso de amortecedores capazes de suportar 30% mais do que a força de projeto com um sismo de nível máximo considerado (MCE) estabelecido pela norma ASCE 7-16. O método proposto não recomenda aumentar a capacidade (robustez do amortecedor) mas se o amortecimento do dispositivo e é semelhante às especificações da ASCE 7-16, com a diferença de que o método proposto recomenda aumentar o coeficiente de amortecimento em 25% em comparação com a norma. Os resultados indicaram que o método proposto reduz a probabilidade de dano dos amortecedores assim como também as demandas máximas da estrutura a diferentes níveis de risco sísmico.

Em relação à otimização de amortecedores viscosos Moradpour e Dehestani, 2019, apresentaram um procedimento de otimização de projeto baseado em deslocamento direto (DDBD), com o intuito de projetar pórticos de aço equipados com amortecedores viscosos. O problema de otimização proposto consiste em determinar a distribuição ideal de amortecedores viscosos na estrutura para obter uma razão de amortecimento adicional desejada (um amortecedor por pavimento), minimizando o coeficiente de amortecimento total de todos os amortecedores da estrutura. A otimização foi realizada usando o algoritmo genético para determinar os coeficientes de amortecimento de cada amortecedor. O desempenho do método foi avaliado através da análise dinâmica de vários pórticos com diferente número de andares equipados com amortecedores viscosos lineares e não lineares submetidos a excitação sísmica. Os resultados mostraram que o uso de amortecedores viscosos não lineares cumpre com o desempenho esperado, com uma redução considerável do coeficiente de amortecimento total

assim como também da força máxima no amortecedor e consequentemente no custo do sistema de controle em comparação com os amortecedores lineares.

Parcianello et al., 2017, usaram também o algoritmo genético para a otimização do tamanho de amortecedores viscosos não lineares em estruturas, tomando como exemplo uma estrutura de concreto armado. A otimização foi realizada no software TOSCA (*Tool for Optimisation in Structural and Civil Engineering Analysis*).

Levando em consideração objetivos realistas de otimização, Pollini, et al., 2016, propuseram um procedimento para otimizar locais e tamanhos de amortecedores viscosos para a resistência sísmica de pórticos tridimensionais usando amortecedores viscosos. O problema foi resolvido usando um algoritmo de programação linear sequencial minimizando uma função objetivo de custo realista baseada em: 1) o trabalho associado à instalação de um amortecedor em uma localização potencial no pórtico e a interferência arquitetural causada por sua presença; 2) o custo direto de fabricação dos amortecedores e 3) o custo do projeto e teste do protótipo para cada tamanho de amortecedor. O procedimento foi feito sujeito a restrições de deslocamento relativo entre andares e envolve variáveis discretas e contínuas.

Pollini et al., 2017, apresentaram um procedimento para distribuição e dimensionamento ótimo de amortecedores viscosos não lineares. Para a otimização foi minimizada uma função objetivo de custo realista que considera os aspectos econômicos da distribuição dos amortecedores na estrutura, tamanho e testes do protótipo. A abordagem proposta permite o projeto de custo mínimo de amortecedores viscosos não lineares e seus membros de suporte devido a que o procedimento leva em conta os coeficientes de amortecimento e os coeficientes de rigidez dos braços de suporte.

2.6 OpenSees

A análise estrutural para a metodologia apresentada neste trabalho foi realizada no software OpenSees (*Open System for Earthquake Engineering Simulation*).

OpenSees foi desenvolvido como uma plataforma de computação para a simulação e análise da resposta sísmica de sistemas estruturais pelo *Pacific Earthquake Engineering Research Center* (PEER) e a universidade de Califórnia, Berkeley.

OpenSees é um *software* de código aberto que usa o método de elementos finitos para a análise estrutural de modelos lineares e de modelos realistas de comportamento não linear. O

software usa a linguagem de interpretação TCL (*Tool Command Language*) ou linguagem de ferramentas de comando para suporte dos comandos de OpenSees, os quais são usados para a definição da geometria do problema, estados de carga, formulação e solução. TCL foi criado por John Ousterhout na universidade de Berkeley, e fornece ferramentas de programação úteis, permite a manipulação de variáveis, contém estruturas básicas de controle (*if*, *while*, *for*, *foreach*) e manipulação de arquivos, o que a torna uma linguagem muito poderosa, além de ser muito fácil de aprender [Cedillo e Ramírez, 2005]. Alonso, 2004, complementa que uma das características mais importantes desta linguagem é a facilidade com que novos comandos podem ser adicionados aos já existentes no TCL padrão.

O *software* OpenSees também possui uma grande biblioteca de materiais, elementos e comandos de análise que o tornam uma ferramenta poderosa para a simulação numérica de sistemas estruturais. A seguir são apresentados alguns trabalhos nos quais o OpenSees foi usado.

Devido à limitação de *software* comerciais para investigação aprofundada de tópicos específicos, Lu et al., 2015, desenvolveram um novo modelo de elemento de parede cortante (*shear wall*) e modelos constitutivos do material associado usando o *software* de código aberto OpenSees, com o intuito de realizar análise sísmico não linear em estruturas de grande altura.

O código aberto de OpenSees permitiu a melhoria constante do *software* a fim de analisar uma gama maior de fenômenos relacionados com aplicações estruturais. Foram criadas novas classes que definem a distribuição da temperatura ao longo do tempo nas seções dos membros, assim como também foram adicionadas novas funções às classes de elementos existentes para calcular a resposta dos membros devido à carga térmica, levando em conta a degradação do material. Por esse motivo, Jiang e Usmani, 2013, apresentaram um relatório sobre procedimentos de análises para estruturas expostas ao fogo no *software* OpenSees.

Gandelli et al., 2019, propuseram um modelo de isoladores sísmicos de tipo deslizante de superfície curva (*curved surface slider*) codificado em OpenSees a partir da modificação do elemento SingleFPSimple3d padrão. O novo elemento desenvolvido CSSBearing_BVNC inclui o atrito estático antes do deslizamento como novidade.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

Uma das abordagens mais estudadas e de maior relevância com relação ao projeto de estruturas metálicas, sem dúvidas, é a de obtenção de estruturas resistentes a cargas dinâmicas com o menor peso possível. No presente trabalho, é proposto um método para o projeto ótimo de pórticos de aço resistentes à excitação sísmica minimizando o peso da estrutura fazendo controle da resposta sísmica usando amortecedores viscosos ótimos posicionados ao longo de toda a estrutura.

Para o desenvolvimento da metodologia proposta são realizadas duas etapas, na primeira é realizada a otimização de um pórtico de aço sob carga sísmica, sem levar em consideração restrições de deslocamento ou controle dinâmico, mas sujeito a outras restrições estipuladas pelas especificações ANSI/AISC 360-16, as disposições ANSI/AISC 341-16 e o manual LRFD – AISC. Posteriormente, na segunda etapa e para o controle dos deslocamentos do pórtico devido à excitação sísmica são usados amortecedores viscosos em cada andar do pórtico, otimizados com o objetivo de obter um deslocamento relativo entre andares (*drift*) determinado, o qual será igual ao valor da restrição de *drift* de 0,25% dada pelas normas mencionadas acima. Finalmente é obtido um pórtico equipado com amortecedores viscosos otimizados, respeitando todas as restrições definidas e resistente à carga sísmica. O presente trabalho foi desenvolvido em duas etapas, devido à grande demanda computacional da otimização simultânea, que teria um espaço de busca muito maior e, conseqüentemente, um maior número de combinações para as possíveis soluções.

Depois de obter o projeto ótimo do pórtico equipado com amortecedores é realizada uma comparação com um pórtico resistente também a carga sísmica e respeitando todas as restrições, mas sem usar amortecedores e são observadas as variações nos deslocamentos, acelerações e massa gerada pela adição dos amortecedores ao pórtico de aço para controlar a resposta dinâmica.

A otimização dos pórticos e amortecedores é feita usando o algoritmo de evolução diferencial (*Differential Evolution* – DE) programado em MATLAB e a resposta estrutural é obtida de uma análise dinâmica no *software* OpenSees. A metodologia usada no presente trabalho seguiu o fluxograma de atividades da Figura 3.1.

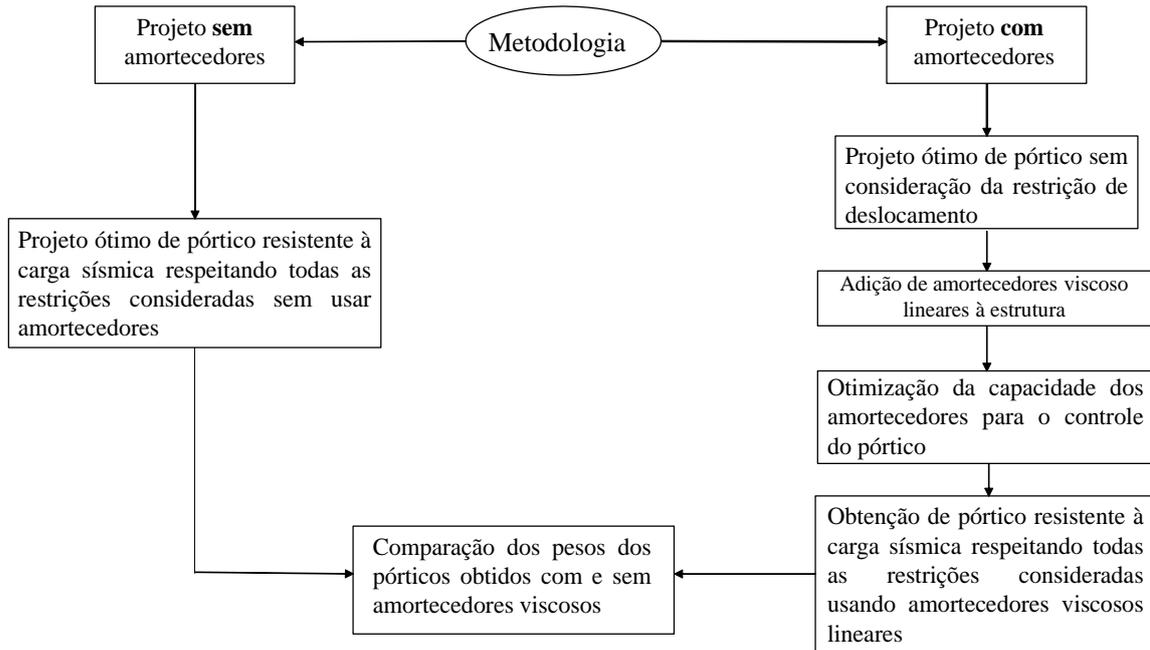


Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia trabalhada

3.1 Otimização do Pórtico de Aço

Como mencionado acima, os elementos definidos para a formulação do problema de otimização no projeto de pórticos de aço são: as variáveis de projeto, função objetivo e as restrições. Esses elementos, bem como outros conceitos envolvidos no processo de otimização, como os parâmetros de projeto e a função de penalização, são descritos abaixo.

3.1.1 Variáveis e Parâmetros de Projeto

As variáveis de projeto são os parâmetros do problema que permitem modificações para a realização da otimização do sistema estrutural (pórtico). Para o projeto de pórticos de aço no presente trabalho foram considerados como variáveis de projeto os tipos de seção (Perfis tipo W) das vigas e colunas do pórtico otimizado. O problema de otimização é desenvolvido como um problema de variável discreta, visto que para cada tipo de seção W do banco de dados usado na otimização foi atribuído um número inteiro positivo, ou seja, os elementos do pórtico são representados por variáveis de projeto discretas (1, 2, 3, ... n).

Tendo em consideração condições de construção, como por exemplo que o tipo de seção das colunas dos andares 1, 2 e 3 do pórtico seja o mesmo, as variáveis de projeto representarão

conjuntos de elementos com a mesma seção. De uma forma mais específica, neste trabalho, é considerado um único tipo de seção para todas as vigas do pórtico projetado, enquanto os conjuntos de seções para as colunas vão depender do número de andares do pórtico a projetar, esses conjuntos serão definidos mais adiante no Capítulo 4.

Em outras palavras e como mostrado na Figura 3.2, em geral as variáveis de projeto podem formar conjuntos de seções onde, por exemplo, x_1 pode representar o tipo de seção das colunas dos dois primeiros andares do pórtico, x_2 pode representar as seções dos andares 3 e 4, e conseqüentemente x_n representara o tipo de seção do enésimo conjunto de colunas do pórtico. Finalmente, x_{n+1} representa o tipo de seção de todas as vigas do pórtico, localizado como o último elemento do vetor de variáveis de projeto x no problema de otimização proposto, o qual pode ser representado como:

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n \ x_{n+1}]. \quad (3.1)$$

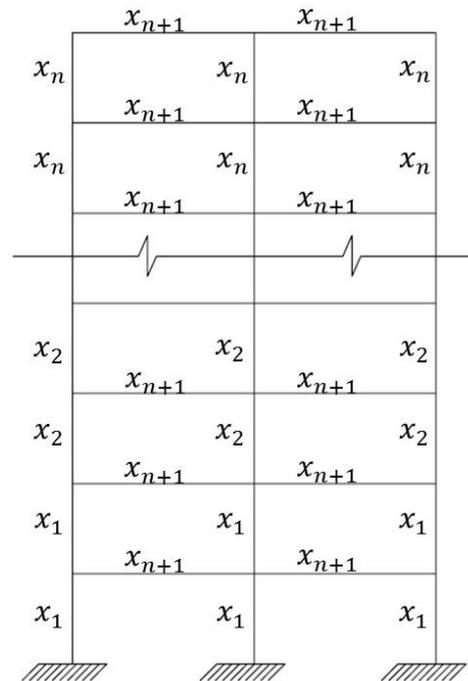


Figura 3.2 - Representação das variáveis de projeto para a otimização de pórticos de aço.

Os parâmetros de projeto são aqueles parâmetros que não mudam durante o processo de otimização, para o presente problema são: altura do pórtico, número de vãos, propriedades do material, sinais de excitação sísmica, número de andares, entre outros.

3.1.2 Função Objetivo

Com a finalidade de classificar e medir a qualidade (peso, custo, etc.) dos projetos obtidos no processo de otimização (soluções do problema) foi definida a função objetivo do problema como a função geral que minimiza o peso dos pórticos de aço projetados.

A função objetivo usada é simples e depende do tipo de seção e do comprimento dos membros estruturais do pórtico. É descrita pela função

$$f_p(x) = \sum_{i=1}^{Ne} \rho L_i A_i \quad (3.2)$$

onde x é uma representação genérica do vetor das variáveis de projeto; ρ é a densidade do material; L_i e A_i são o comprimento e a área da seção transversal do i -ésimo membro, respectivamente; Ne representa o número de membros (elementos) do pórtico.

3.1.3 Restrições de Projeto

As restrições de projeto são as limitações que são impostas ao processo de projeto com o intuito de obter uma solução ótima. A aplicação dessas restrições visa garantir uma condição favorável de conforto, proporcionar facilidade e viabilidade no processo de construção das estruturas, impedir o colapso e salvaguardar vidas humanas, entre outros.

Além dos limites entre os quais as variáveis de projeto podem variar no projeto de pórticos de aço, no presente trabalho são consideradas as restrições de deslocamento (deslocamento relativo entre andares e deflexão em vigas), esbeltez em colunas, carga, a restrição *strong column weak beam* (SC/WB), e como restrição gruposa a limitação da área da seção das colunas do pórtico. O projeto estrutural dos pórticos foi feito de acordo com as especificações AISC 360-16 e o manual de construção em aço AISC – LRFD, portanto os valores das restrições foram definidos da seguinte maneira:

3.1.3.1 Restrições de deslocamento

Os deslocamentos excessivos nas estruturas ou em seus membros costumam causar danos aos componentes não estruturais, rachaduras nos acabamentos ou revestimentos e danos no sistema hidráulico, por esse motivo, é importante levar em consideração uma limitação dos diferentes deslocamentos nas estruturas. Para o projeto ótimo do pórtico de aço sob carga sísmica sem controle dos deslocamentos apenas é restrita a deflexão nas vigas. Para restringir

e controlar o deslocamento relativo entre andares é incluída também a restrição do *drift*. Esta restrição não é usada na otimização do pórtico (em um primeiro momento), pois o controle do *drift* é feito com os amortecedores viscosos instalados na estrutura.

▪ **Restrição de deslocamento relativo entre andares (*drift*)**

A restrição do deslocamento relativo entre andares é dada por

$$g_1(x): \quad \Delta_{hi} \leq \frac{h_i}{400} \quad (3.3)$$

onde Δ_{hi} é o deslocamento relativo entre andares (chamado de *drift*), definido por $\Delta_{hi} = v_i - v_{i-1}$, ou seja, a diferença entre o deslocamento v_i no andar i e o deslocamento v_{i-1} do andar $i - 1$. O deslocamento relativo máximo entre andares é especificado como $\frac{h_i}{400}$ segundo as especificações AISC 360-16, essa quantidade é conhecida como relação de deslocamento relativo entre andares (*interstory drift ratio*), onde h_i é a altura do andar correspondente i , e é o valor mais usado para a restrição de deslocamento relativo entre andares. Kaveh et al., 2014, fazendo uso das normas americanas, também usaram o valor de $\frac{h_i}{400}$ para a limitação de deslocamento em seu trabalho de otimização de estruturas de aço 3D de tamanho real sob carga sísmica. Em outras palavras, o deslocamento relativo entre andares em relação à altura do pavimento deve ter um valor menor ou igual a 0,25%.

Segundo Gong, 2007, a restrição de deslocamento relativo entre andares sempre governa em zonas de alta atividade sísmica para novas edificações com estrutura de aço.

▪ **Deflexão em vigas**

Os desvios verticais excessivos nas vigas geralmente podem ser visíveis, também podem causar rachaduras ou vazamentos no revestimento exterior, portas, janelas e vedações; causar danos aos componentes e acabamentos internos. Para o controle desses efeitos, a restrição de deflexão nas vigas foi definida de acordo com o manual AISC – LRFD como

$$g_2(x): \quad \delta_{vi} \leq \frac{L_{vi}}{360} \quad (3.4)$$

onde δ_{vi} é a deflexão na viga i e L_{vi} o comprimento da viga i .

3.1.3.2 Restrição de esbeltez em colunas

A seleção de colunas é uma das tarefas de maior importância no projeto estrutural devido a que devem ser consideradas seções transversais apropriadas para resistir as cargas axiais (P_u) e momentos (M_u) requeridos além dos efeitos da esbeltez das colunas. Segundo Carrillo, 2004, o efeito da esbeltez consiste em uma redução da resistência de um elemento sujeito a qualquer tipo de carga axial de compressão devido a que seu comprimento é muito maior que as dimensões de sua seção transversal. De uma maneira mais geral, uma coluna é esbelta quando as dimensões de sua seção transversal são muito pequenas em relação a seu comprimento. Para evitar falhas de estabilidade nas colunas da estrutura, as especificações ANSI/AISC 360-16 recomendam uma relação de esbeltez menor que 200 para colunas ou membros à compressão, isto é descrito por

$$g_3(x): \frac{L_{ci}}{r_i} = \frac{KL_i}{r_{yi}} < 200 \quad (3.5)$$

onde $L_{ci} = KL_i$ é o comprimento efetivo do membro i e r_i o menor raio de giração do perfil do membro i (r_y para perfis estruturais W); L_i é o comprimento da coluna; K é o fator de comprimento efetivo que depende do tipo de juntas nas extremidades dos membros. Para o presente trabalho foi considerado um valor de $K = 1$ de acordo com a tabela C-A-7.1 das especificações ANSI/AISC 360-16, coluna tipo (c).

3.1.3.3 Restrição de carga axial e flexão

Os elementos estruturais devem ter suficiente resistência para suportar as cargas dinâmicas e de gravidade, portanto é necessário aplicar restrições de resistência aos membros no projeto de pórticos de aço. De acordo com o manual LRFD – AISC, a interação de flexão e carga axial em perfis duplamente simétricos, como as seções W, deve ser limitada pela expressão

$$g_4(x): \begin{array}{ll} \text{Para } \frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0,2; & \frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1 \\ \text{Para } \frac{P_u}{\phi P_n} < 0,2; & \frac{P_u}{2\phi P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1 \end{array} \quad (3.6)$$

onde P_u é a resistência axial requerida e P_n a resistência axial disponível; M_{ux} e M_{uy} são as resistências à flexão requeridas com relação ao eixo x e ao eixo y, respectivamente; M_{nx} e M_{ny} são as resistências à flexão disponíveis com relação ao eixo x e ao eixo y, respectivamente; ϕ é o fator de resistência de carga axial que é dado como 0,90 para tração e 0,85 para compressão em um projeto LRFD. E finalmente ϕ_b é o fator de resistência a flexão que está definido com o valor de 0,90. A resistência axial disponível P_n foi calculada de acordo com os capítulos D e E das especificações ANSI/AISC 360-16 para tração e compressão respectivamente. As resistências à flexão disponíveis M_{nx} e M_{ny} foram calculadas de acordo com o capítulo F das especificações ANSI/AISC 360-16. Para o projeto dos elementos a tração e flexão foi considerado o estado limite de escoamento e para os elementos a compressão foi considerado um estado limite de flambagem por flexão de acordo com a norma ANSI/AISC 360-16.

3.1.3.4 Restrição *Strong column/weak beam* (SC/WB)

De acordo com as disposições ANSI/AISC 341-16, o conceito de *Strong column/weak beam* (SC/WB) é um foco de projeto que tem como objetivo fornecer colunas suficientemente fortes como para distribuir a cedência do pórtico em vários andares, como mostrado na Figura 3.3 (b), em vez de concentrar toda a deformação inelástica nas colunas de só um pavimento, como pode ser visto na Figura 3.3 (a).

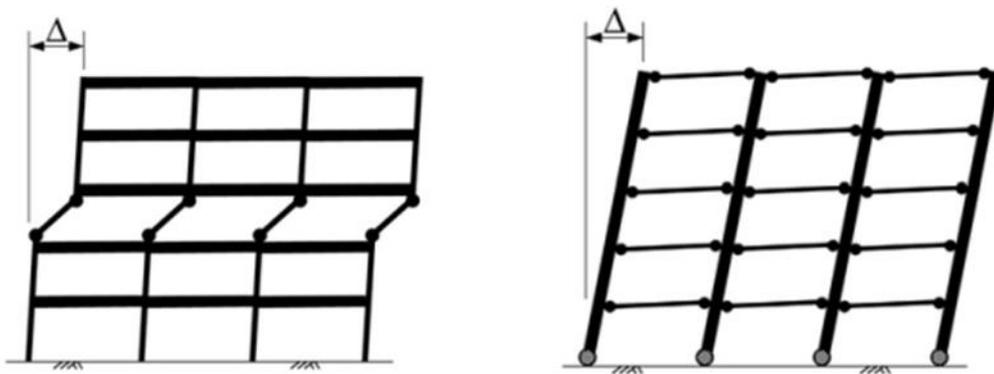


Figura 3.3 - Representação do deslocamento relativo em um pórtico sob carga sísmica em relação ao conceito SC/WB; (a) Deslocamento relativo sobre um andar em um pórtico sem a consideração de SC/WB; (b) Deslocamento relativo uniforme em um pórtico considerando SC/WB. [Adaptado de Moehle et al., 2008]

O efeito do conceito de SC/WB pode ser analisado desde as características do deslocamento relativo entre andares ou *drift* do pórtico, ou seja, se o pórtico de aço sob carga sísmica tem colunas fracas os *drifts* geralmente concentram-se em um ou em uns poucos andares, o que acaba por ser muito perigoso porque os deslocamentos podem ser excessivos e levar à estrutura ao colapso. Para o caso contrário, quando o pórtico tem colunas fortes os *drifts* são distribuídos de uma maneira uniforme por toda a estrutura conseguindo com isso uma maior dissipação da energia sísmica e envolvendo todo o conjunto da estrutura na tentativa de amortecer a carga sísmica.

Entendendo que a falha de uma coluna representa um risco maior que a falha de uma das vigas de uma estrutura, as disposições ANSI/AISC 341-16 exigem que a soma das resistências à flexão das colunas em uma junta seja maior que a soma das resistências à flexão das vigas na mesma junta. Essa consideração é expressa como

$$g_5(x): \frac{\sum M_{Ci}}{\sum M_{Vi}} > 1 \quad (3.7)$$

onde o termo $\sum M_{Ci}$ é o somatório dos momentos fletores disponíveis nas colunas da junta i e $\sum M_{Vi}$ é o somatório dos momentos fletores disponíveis das vigas da mesma junta.

3.1.3.5 Restrição geométrica

No projeto de pórticos de aço, por razões práticas, geralmente são levadas em conta algumas considerações de tipo geométrico com o intuito de facilitar e minimizar o custo de construção. Nos pórticos de aço sempre é desejado que a seção transversal das colunas de um andar superior não seja maior que a seções de um andar inferior, razão pela qual para o presente trabalho foi levada em conta uma restrição geométrica para as conexões coluna-coluna em relação à área da seção transversal. A restrição considerada é usada procurando-se que a área da seção das colunas de um andar inferior seja maior ou igual que a das colunas superiores e é escrita como

$$g_6(x): \frac{A_{C\ i-1}}{A_{C\ i}} \geq 1 \quad (3.8)$$

onde A_{C_i} e $A_{C_{i-1}}$ são a área da seção transversal das colunas do andar superior i e do andar inferior $i - 1$, respectivamente.

Choi e Park, 2012, propuseram um método de projeto sísmico multiobjectivo para garantir a distribuição uniforme da carga sísmica em pórticos de aço (conceito SC/WB) levando em conta a restrição de área de seção transversal das colunas dos pórticos de aço, ou seja usando seções maiores nos andares inferiores.

3.1.4 Função de penalização

Os problemas de projeto ótimo de pórticos de aço geralmente são problemas restritos devido a diferentes aspectos que devem ser levados em consideração de acordo com as normas de projeto e fabricação. O problema de otimização de pórticos de aço restrito pelas especificações ANSI/AISC 360-16, as disposições ANSI/AISC 341-16 e o manual LRFD – AISC do presente trabalho foi transformado em um problema de otimização sem restrições usando uma função de penalização. A forma geral da função de penalização usada é dada por

$$W_p = W(1 + \beta C)^\lambda \quad (3.9)$$

onde W é a função objetivo do problema de projeto ótimo de pórticos de aço, ou seja, a massa do pórtico; W_p é a massa penalizada do pórtico; C é a função de violação de restrições, calculada de acordo com o trabalho de Pezeshk et al., 2000 como a somatória da violação individual de cada restrição como descrito nas Equações 3.10 e 3.11; λ é um expoente de penalização definido como 10 para o presente trabalho e β é um fator de penalização definido como 50. λ e β foram definidos usando um processo de tentativa e erro.

$$C = \sum_{i=1}^{Nr} C_i \quad (3.10)$$

$$C_i = \begin{cases} 0 & \text{se } g_i \text{ é respeitada} \\ 1 & \text{se } g_i \text{ não é respeitada} \end{cases}; \quad i = 1, 2, \dots, Nr \quad (3.11)$$

onde g_i é a i -ésima restrição do problema e Nr o número total de restrições. As restrições para o projeto ótimo de pórticos de aço sob carga sísmica são dadas nas Equações 3.3 até 3.8.

O problema de otimização para a primeira fase, ou seja, a fase de otimização do pórtico de aço pode ser escrita da seguinte forma:

Encontrar:

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n \ x_{n+1}] \quad (3.12)$$

Que minimiza:

$$f_p(x) = \sum_{i=1}^{Ne} \rho L_i A_i, \quad i = 1, 2, \dots, Ne \quad (3.13)$$

Sujeito a:

$$\delta_{vi} \leq \frac{L_{vi}}{360} \quad (3.14)$$

$$\frac{KL_i}{r_{yi}} < 200 \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \text{Para } \frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0,2; \quad & \frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1 \\ \text{Para } \frac{P_u}{\phi P_n} < 0,2; \quad & \frac{P_u}{2\phi P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1 \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\frac{\sum M_{Ci}}{\sum M_{Vi}} > 1 \quad (3.17)$$

$$\frac{A_{C\ i-1}}{A_{C\ i}} \geq 1 \quad (3.18)$$

E para a otimização de um pórtico de aço que consiga respeitar as especificações de *drift* sem utilizar amortecedores é, além, usada a restrição:

$$\Delta_{hi} \leq \frac{h_i}{400} \quad (3.19)$$

3.2 Otimização de amortecedores

Depois de obter o projeto ótimo do pórtico de aço sem levar em conta a restrição de *drift*, ou seja, sem a limitação dos deslocamentos da estrutura, é considerada a instalação de amortecedores viscosos com o intuito de limitar a resposta dinâmica e respeitar as recomendações de *drift* dadas pelos regulamentos. Para o projeto otimizado de um pórtico de aço resistente à carga sísmica e com uma economia significativa de material, os amortecedores foram instalados em toda a estrutura, ou seja, um amortecedor por cada andar do pórtico e na disposição amostrada na Figura 3.4.

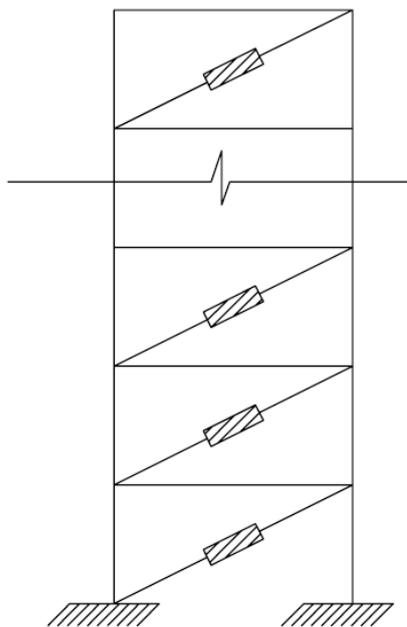


Figura 3.4 - Posição dos amortecedores viscosos no pórtico de aço.

A otimização dos amortecedores foi realizada sem a consideração de restrições e somente de acordo com a exigência da função objetivo, a qual está relacionada com o cumprimento da limitação do deslocamento relativo entre andares. Por esse motivo, a otimização não possui uma função de penalidade. A seguir são descritos os elementos levados em conta para a otimização dos amortecedores.

3.2.1 Variáveis e parâmetros de projeto

No projeto ótimo dos amortecedores para o controle dos deslocamentos do pórtico de aço foram considerados como variáveis de projeto as constantes de amortecimento de cada amortecedor da estrutura, sendo este o parâmetro que vai ser modificado para a busca das possíveis soluções do problema. As variáveis de projeto são de tipo contínuo e o vetor de variáveis de projeto pode ser representado como

$$\mathbf{x} = [c_1 \ c_2 \ c_3 \ \dots \ c_n] \quad (3.20)$$

onde c_1 , c_2 e c_3 são as constantes de amortecimento dos amortecedores nos andares 1, 2 e 3, respectivamente e c_n a constante do amortecedor do andar n do pórtico.

Com relação aos parâmetros de projeto, um novo parâmetro a considerar na otimização dos amortecedores é o número ou a quantidade destes no pórtico. Para o presente trabalho foi considerado um amortecedor por cada andar como mostrado na Figura 3.4.

3.2.2 Função objetivo

A função objetivo para o processo de otimização dos amortecedores viscosos no pórtico de aço foi definida com o intuito de obter uma estrutura que consiga respeitar a especificação de *drift* dada pela norma. Desta forma, o processo tem como objetivo minimizar a função f_a apresentada na Equação 3.13, a qual foi definida como o valor absoluto da diferença entre 0,24 e o *drift* máximo $\Delta_{a,max}$ do pórtico equipado com amortecedores viscosos. A função objetivo para esta fase foi definida desta forma com o fim de obter um valor de *drift* máximo do pórtico menor que 0,25% da altura do andar, e é dada por

$$f_a(x) = abs(0,24 - \Delta_{a,max}) \quad (3.21)$$

onde $\Delta_{a,max}$, no processo de otimização, são os valores do *drift* máximo das possíveis soluções entregues pelo processo de otimização. Desta maneira é determinada a qualidade dos projetos obtidos.

Em resumo e lembrando que o processo não tem restrições, o problema de otimização para a segunda fase do trabalho pode ser escrito da seguinte forma:

Encontrar:

$$\mathbf{x} = [c_1 \ c_2 \ c_3 \ \dots \ c_n] \quad (3.22)$$

Que minimiza:

$$f_a(\mathbf{x}) = \text{abs}(0,24 - \Delta_{a,max}) \quad (3.23)$$

3.3 Algoritmo de evolução diferencial (DE)

Como mencionado anteriormente, o algoritmo DE foi desenvolvido por Rainer Storn e Kenneth Price em 1997 como um meta-heurístico de busca direta para a otimização de parâmetro real, com a capacidade de otimizar funções espaciais contínuas que podem ser não lineares e não diferenciáveis.

Para a implementação do DE são aplicados três operadores a cada indivíduo ou também conhecido como vetor objetivo (*target vector*), os quais são: mutação, crossover (recombinação) e seleção. A geração de melhores soluções no DE depende, em maior medida, da operação de mutação. Esta operação é baseada principalmente na diferença de pares de soluções escolhidas aleatoriamente na população. A operação de mutação funciona como uma ferramenta de busca para direcionar este processo na direção de possíveis regiões de soluções no espaço de busca do processo de otimização. O algoritmo DE usa também uma operação de crossover não uniforme que pode pegar elementos vetoriais do vetor objetivo e do vetor mutante (pais), esta operação mostra de forma eficiente informação sobre combinações bem-sucedidas permitindo a busca de um melhor espaço de soluções.

De um jeito mais geral, um processo de otimização de um problema que está constituído por D variáveis de projeto é convenientemente representado por um vetor D -dimensional. Para o DE inicialmente é gerada uma população aleatória de NP vetores de solução, esta população

é melhorada usando as operações de mutação, crossover e seleção. No esquema da Figura 3.5 são mostradas as etapas básicas do *Differential Evolution*.

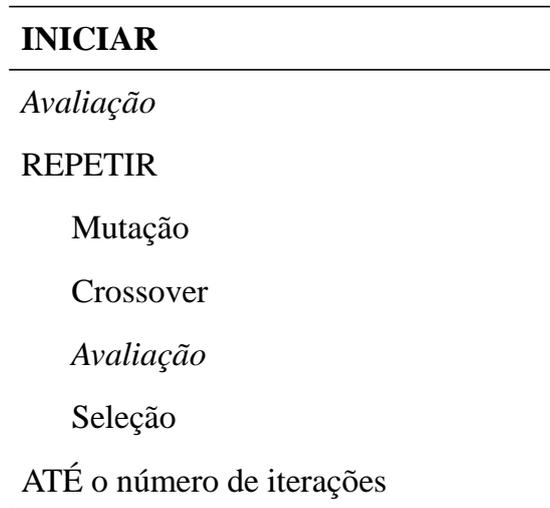


Figura 3.5 - Etapas básicas do DE. [Adaptada de Karaboga e Gkelem,2004]

3.3.1 Inicializa o

Como mencionado acima, a popula o inicial   gerada aleatoriamente. Considerando que o k -ésimo indivíduo da popula o para a gera o G   denotado por $x_{k,G}$, conhecido como vetor objetivo (*target vector*) e definido como

$$\mathbf{x}_{k,G} = [x_{1,k,G} \ x_{2,k,G} \ x_{3,k,G} \ \dots \ x_{D,k,G}], \quad k = 1, 2, 3, \dots, NP \quad (3.24)$$

sendo D o número de variáveis do problema e NP o tamanho da popula o. A j -ésima variável do k -ésimo indivíduo da popula o   selecionada aleatoriamente para a popula o inicial na primeira gera o ($G = 1$) como

$$x_{j,k,1} = x_{j,min} + rand_{k,j}[0,1](x_{j,max} - x_{j,min}), \quad j = 1, 2, 3, \dots, D \quad (3.25)$$

onde $x_{j,min}$ e $x_{j,max}$ são os limites mínimos e máximos (restrições laterais) da j -ésima variável de projeto respectivamente e $rand_{k,j}[0,1]$ representa um número aleatório uniformemente distribuído entre 0 e 1.

3.3.2 Mutação

Na geração $G + 1$, para o k -ésimo indivíduo da população $x_{k,G}$, o algoritmo DE cria um indivíduo mutante $v_{k,G+1}$ através da operação de mutação como

$$\mathbf{v}_{k,G+1} = [v_{1,k,G+1} \ v_{2,k,G+1} \ v_{3,k,G+1} \ \dots \ v_{D,k,G+1}] \quad (3.26)$$

Storn e Price, 1997, estabeleceram diferentes variantes do DE que diferem principalmente na maneira em que a operação de mutação é executada. Para o presente trabalho foi usada a variante DE/rand/1, a qual é uma das variantes mais populares do DE e é dada por

$$\text{DE/rand/1: } \mathbf{v}_{k,G+1} = \mathbf{x}_{r_1^k,G} + F \left(\mathbf{x}_{r_2^k,G} - \mathbf{x}_{r_3^k,G} \right) \quad (3.27)$$

onde r_1^k , r_2^k , e r_3^k são índices mutuamente exclusivos e aleatórios selecionados no intervalo $[1, NP]$. Esses índices são também diferentes do índice base k . O termo F é um fator real conhecido como fator de escala de mutação e pode ser selecionado de $[0,2]$, esse fator controla a amplificação da variação diferencial $\left(\mathbf{x}_{r_2^k,G} - \mathbf{x}_{r_3^k,G} \right)$.

3.3.3 Crossover

Depois da geração do indivíduo mutante $\mathbf{v}_{k,G+1}$ mediante a operação de mutação é ativada a operação de crossover. Nesta operação o indivíduo mutante $\mathbf{v}_{k,G+1}$ troca componentes com o indivíduo *target* $\mathbf{x}_{k,G}$ com uma probabilidade $CR \in [0,1]$ para formar o indivíduo de teste (*trial vector*) dado por

$$\mathbf{u}_{k,G+1} = [u_{1,k,G+1} \ u_{2,k,G+1} \ u_{3,k,G+1} \ \dots \ u_{D,k,G+1}] \quad (3.28)$$

onde D é o número de variáveis de projeto do problema. Na operação de crossover cada elemento do indivíduo de teste $u_{j,k,G+1}$ é selecionada do indivíduo mutante ou do indivíduo *target* seguindo a seguinte condição:

$$u_{j,k,G+1} = \begin{cases} v_{j,k,G+1} & \text{se } (rand_{j,k}[0,1] \leq CR) \text{ ou } j=j_{rand} \\ x_{j,k,G} & \text{outro caso} \end{cases}; j = 1, 2, 3, \dots, D \quad (3.29)$$

onde CR é um dos parâmetros de controle do algoritmo e é conhecido como taxa de crossover; $rand_{j,k}[0,1]$ é um número uniformemente distribuído entre 0 e 1 e $j_{rand} \in [1, 2, 3, \dots, D]$ é um índice aleatoriamente selecionado entre 1 e D que garante que o indivíduo de teste tenha pelo menos um elemento do indivíduo mutante. A Figura 3.6 apresenta um exemplo de um mecanismo de crossover para vetores de 7 dimensões.

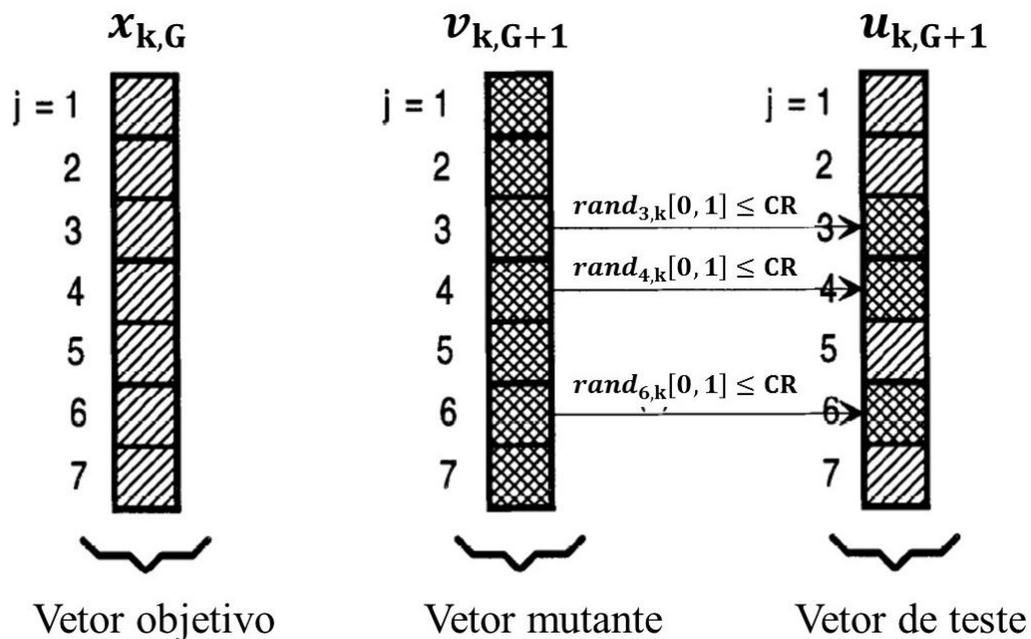


Figura 3.6 - Ilustração do processo da operação de crossover. [Adaptado de Storn e Price, 2007]

3.3.4 Seleção

Na operação de seleção ou substituição é feita uma comparação um a um entre o vetor objetivo $x_{k,G}$ e o vetor de teste $u_{k,G+1}$, o melhor sobrevive à próxima geração. A medida da

qualidade de cada vetor é realizada mediante a avaliação da função objetivo f . A operação de seleção está determinada por:

$$\mathbf{x}_{k,G+1} \begin{cases} \mathbf{u}_{k,G+1} & \text{se } f(\mathbf{u}_{k,G+1}) \leq f(\mathbf{x}_{k,G}) \\ \mathbf{x}_{k,G} & \text{se } f(\mathbf{u}_{k,G+1}) > f(\mathbf{x}_{k,G}) \end{cases} \quad (3.30)$$

De acordo com o acima exposto, o pseudocódigo do algoritmo *Differential Evolution* DE/rand/1 está dado pelo algoritmo apresentado na Figura 3.7.

```

INICIAR
   $G \leftarrow 0$ 
  Gerar uma população aleatória  $x_{k,G} \forall k = 1, 2, 3, \dots, NP$ 
  Avaliar  $f(x_{k,G}) \forall k = 1, 2, 3, \dots, NP$ 
  while  $G \neq G_{max}$ 
    for  $k \leftarrow 1$  até  $NP$ 
      Selecionar aleatoriamente  $\{r_1^k \neq r_2^k \neq r_3^k\} \in [1, NP]$ 
      for  $j \leftarrow 1$  até  $D$ 
         $J_{rand} \leftarrow randi[1, D]$ 
        Operação de mutação
        Operação de crossover
      end for
      Avaliar  $f(u_{k,G+1})$ 
      if  $u_{k,G+1}$  é melhor que  $x_{k,G}$ 
         $x_{k,G+1} \leftarrow u_{k,G+1}$ 
      else
         $x_{k,G+1} \leftarrow x_{k,G}$ 
      end if
    end for
     $G \leftarrow G + 1$ 
  end while
END

```

Figura 3.7 - Pseudocódigo do algoritmo *Differential Evolution* DE/rand/1. [Adaptado de Pantoja et al., 2015]

De uma forma geral os algoritmos meta-heurísticos podem ser aplicados, devido a sua estrutura, a uma grande quantidade de problemas em diferentes campos da ciência com

diferentes características sendo capaz de produzir resultados aceitáveis. Um dos aspectos que limita a qualidade dos resultados obtidos com esse tipo de algoritmo é que precisam da definição, pelo usuário, de alguns parâmetros de controle que os configuram. Em outras palavras, uma das tarefas mais importantes no processo de otimização é a configuração dos parâmetros de controle do algoritmo meta-heurístico para obter um bom desempenho.

Uma maneira de evitar a configuração manual dos parâmetros de controle, o qual é um processo complexo e que precisa de muito tempo além de não fornecer os melhores resultados, pois consiste em parâmetros fixos, é introduzir no algoritmo alguma técnica que determine automaticamente os parâmetros. Eiben et al., 2007 mostraram que existem 3 maneiras de realizar o controle de parâmetros: determinista, adaptativo e auto adaptativo. Para a realização do presente trabalho foi usado um controle de parâmetros determinista que modifica os parâmetros F e CR do algoritmo DE em cada geração de acordo com o aumento do número de gerações passadas no processo de busca (otimização). Esses parâmetros são definidos com o objetivo de reduzir o espaço de busca quanto maior é o número de iterações.

3.4 OpenSees

A análise estrutural dos pórticos de aço neste trabalho, como mencionado anteriormente, foi realizada usando o *software* OpenSees. Para a definição do modelo primeiro é estabelecido o número de nós e as coordenadas nodais para depois adicionar as massas nodais da estrutura. Mais tarde são definidos os materiais dos modelos, ou seja, o material dos membros estruturais do pórtico e o material para a modelagem dos amortecedores viscosos (usados na fase do projeto ótimo com amortecedores viscosos). Para a modelagem do amortecedor viscoso foi usado o material *ViscousDamper* que está baseado no modelo de material visco elástico de Maxwell (*Maxwell material* ou *Maxwell model*). O *Maxwell model* foi implementado para a modelagem do amortecedor viscoso porque não apresenta rigidez em paralelo como o elemento de amortecimento, mas pelo contrário está constituído por um amortecimento puramente viscoso de constante de amortecimento C em série com uma mola linear de rigidez K como é mostrado na Figura 3.8.

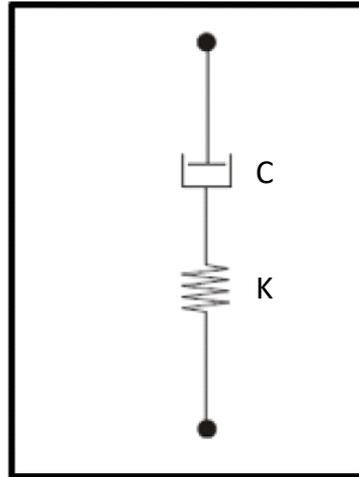


Figura 3.8 - Esquema do Maxwell model. Fonte: Manual do Taylor Devices.

A mola no esquema da Figura 3.8 representa a flexibilidade elástica da carcaça do amortecedor viscoso K_c em série com a do braço de suporte K_{SUP} como apresentado na Figura 3.9.

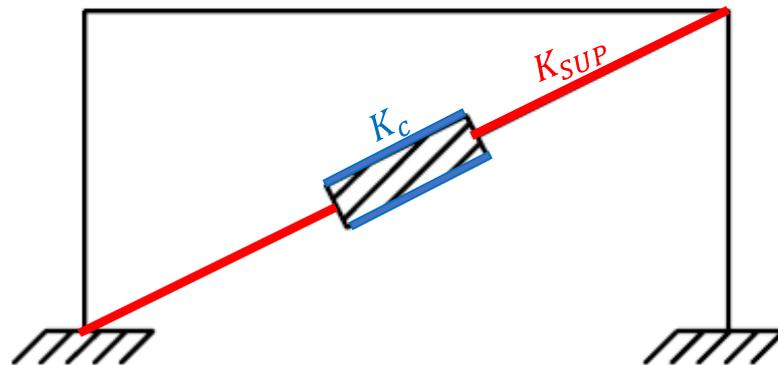


Figura 3.9 - Componente de rigidez do amortecedor viscoso modelado com o *Maxwell model*.

As rigidezes mencionadas estão em série e a rigidez da carcaça do elemento amortecedor geralmente é considerada infinita de acordo com as condições de fabricação, resultando em uma rigidez da mola do *Maxwell model* K definida pelo braço de suporte do dispositivo de amortecimento:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_{SUP}} \quad (3.31)$$

$$K = K_{SUP} \quad (3.32)$$

O próximo passo para a geração da análise estrutural é a construção das seções dos perfis estruturais usados, que para o trabalho aqui feito são perfis W. Posteriormente, escolhe-se o tipo de elemento para a execução da análise de elementos finitos, nesta fase foi selecionado da biblioteca de OpenSees o elemento *nonlinearBeamColumn* para construir a seção em I dos perfis W. Esse tipo de elemento é usado para modelar seções que não são prismáticas. O elemento é tipo viga 2D portanto tem 3 graus de liberdade por nó e foi usada a integração de Gauss-Lobatto para analisar o comportamento dos elementos, pois esse tipo de integração coloca pontos de integração em cada extremidade do elemento, necessários porque geralmente nas extremidades apresentam-se os maiores valores de momento fletor e no total foram utilizados 5 pontos de integração para cada elemento. A seguir são estabelecidas as condições de contorno. Também são definidos os *recorders*, ou seja, os dados de saída (os dados a serem calculados pelo OpenSees) como deslocamentos e esforços. O método de integração usado para a determinação da resposta dinâmica do sistema é o método de Newmark. A atribuição do amortecimento foi feita usando o amortecimento de Rayleigh considerando um amortecimento próprio da estrutura de 5%. E finalmente para a realização dos cálculos é aplicada a carga sísmica mediante uma análise transiente.

Os processos de otimização completos do pórtico de aço e dos amortecedores viscosos no pórtico para o controle da resposta dinâmica são representados nos fluxogramas mostrados nas Figuras 3.10 e 3.11.

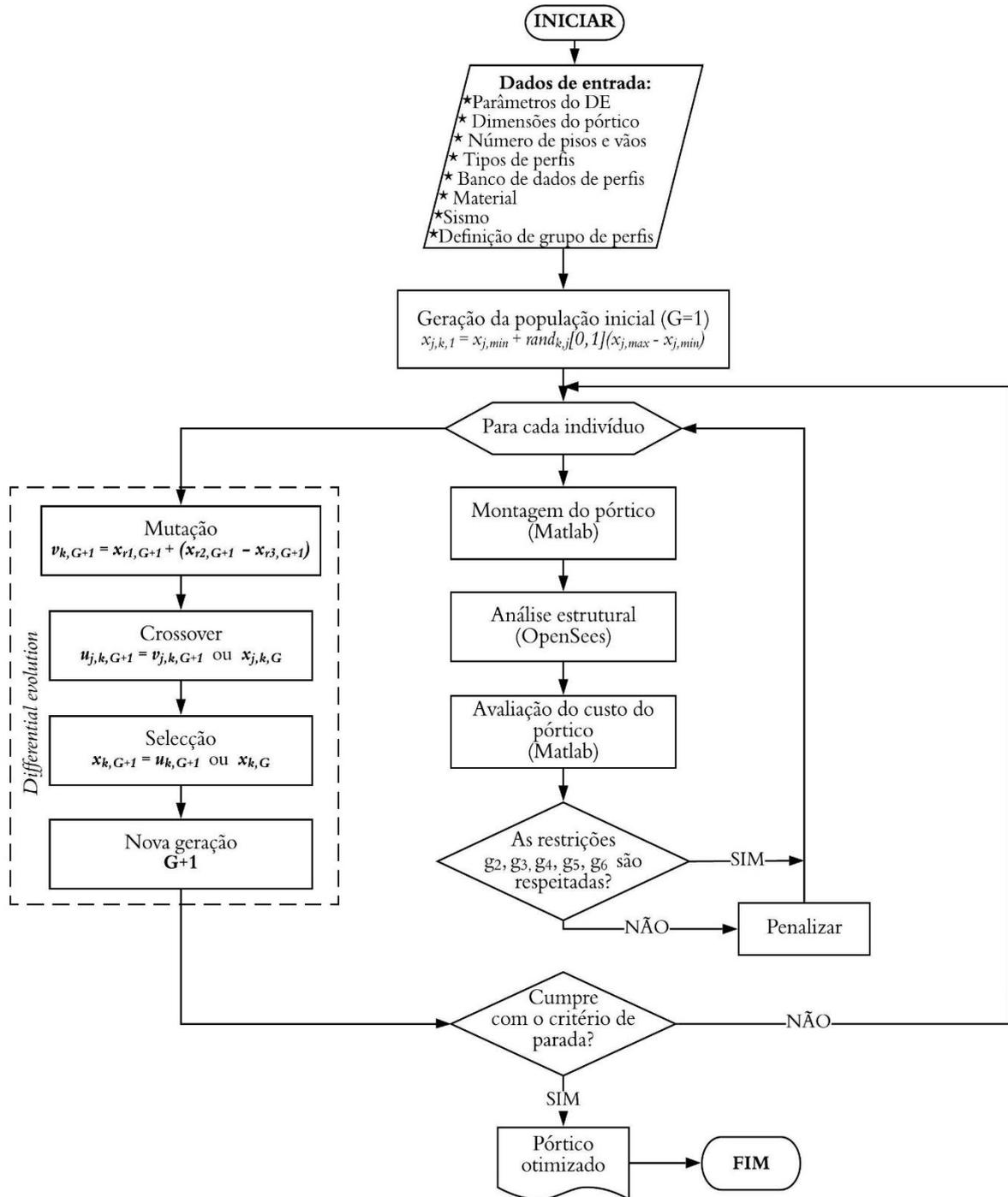


Figura 3.10 – Diagrama esquemático do processo de otimização do pórtico de aço (primeira fase).

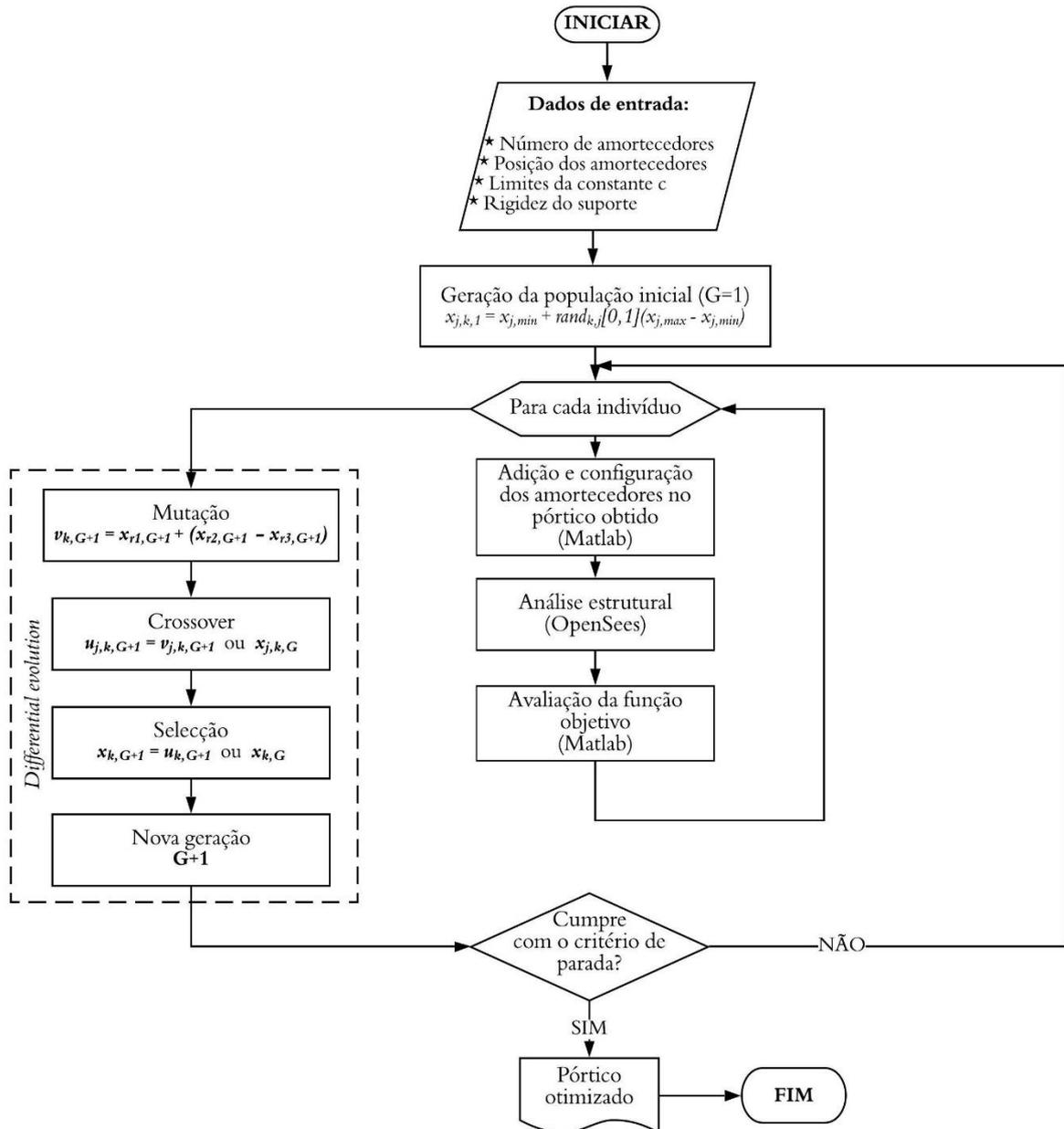


Figura 3.11 – Diagrama esquemático do processo de otimização de amortecedores viscosos (segunda fase).

4 EXEMPLO ILUSTRATIVO: RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com os conceitos e a metodologia apresentados anteriormente, neste capítulo, é feita uma ilustração dos processos de otimização propostos para o pórtico de aço e para os amortecedores viscosos instalados para controlar a resposta dinâmica no pórtico sob carga sísmica. Para a aplicação da metodologia foi otimizado um pórtico de 7 andares e 1 vão, que posteriormente foi equipado com amortecedores viscosos que foram otimizados com o fim de fazer controle e cumprir com os requisitos de *drift* exigidos pela norma. A seguir o exemplo ilustrativo é descrito em detalhe.

4.1 Estrutura a Analisar

O modelo de estrutura escolhido conta com 3 m de altura em cada andar e comprimento do vão de 6 m, como mostrado na Figura 4.1.

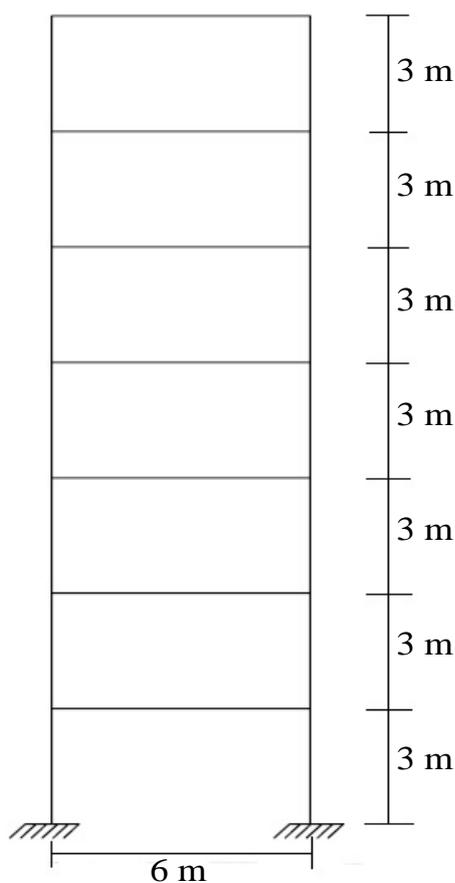


Figura 4.1 - Pórtico analisado.

Para a construção do pórtico foram usados perfis estruturais do tipo W de aço A36 com módulo de elasticidade de 200 GPa e tensão de escoamento de 248,2 MPa. Para a análise dinâmica da estrutura foram consideradas as massas das lajes de concreto (densidade de 2500 kg/m³) de cada andar do pórtico, que foram definidas com uma espessura de 29 cm e o peso próprio da estrutura.

A atribuição do amortecimento próprio da estrutura foi feita usando o amortecimento de Rayleigh com uma razão de amortecimento de 5%. O amortecimento de Rayleigh é um método clássico proporcional à massa e a rigidez do sistema, definido como

$$\mathbf{C}_p = a_0 \mathbf{M} + a_1 \mathbf{K} \quad (4.1)$$

Onde \mathbf{C}_p representa o amortecimento, \mathbf{M} e \mathbf{K} representam a massa e a rigidez da estrutura, respectivamente. Os coeficientes a_0 e a_1 são calculados em função de duas frequências modais previamente definidas ω_i e ω_j como

$$a_0 = \zeta \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (4.2)$$

$$a_1 = \zeta \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (4.3)$$

Sendo ζ a razão de amortecimento, que como mencionado acima para o presente exemplo foi considerada como 5% (0,05). Para o cálculo das constantes a_0 e a_1 foram usadas a primeira e a terceira frequência natural do pórtico, ou seja, ω_1 e ω_3 .

A carga de excitação escolhida para o desenvolvimento do exemplo ilustrativo da metodologia proposta, sendo aplicada ao pórtico de 7 andares, foi um registro sísmico real. O sismo El Centro ocorreu no sudeste da Califórnia, muito perto da fronteira internacional dos Estados Unidos e México em maio de 1940. El Centro foi caracterizado como um evento destrutivo de tamanho moderado. Este terremoto teve magnitude 6.9 na escala do momento e

causou a morte de 9 pessoas. Até recentemente, El Centro foi o terremoto mais grave registrado e tem sido usado como base para muitos trabalhos de pesquisa. A Figura 4.2 apresenta o registro do terremoto El Centro. É importante mencionar que, para o projeto sísmico de estruturas de aço, a norma ASCE 7-16 define a aplicação de vários tipos de ameaça sísmica, no entanto, por capacidade computacional, o presente exemplo ilustrativo é desenvolvido para um único terremoto.

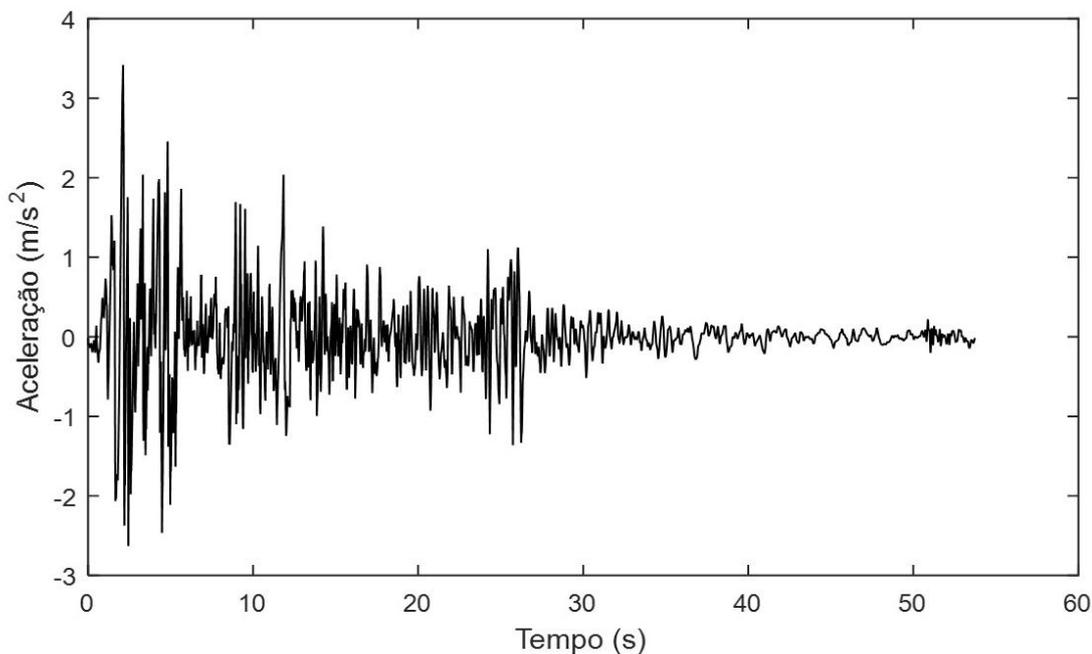


Figura 4.2 - O sismo El Centro.

Como foi mencionado anteriormente, a metodologia proposta nesta dissertação foi desenvolvida em duas fases. A primeira fase está constituída pelo projeto ótimo das vigas e colunas da estrutura sob carga sísmica sem levar em consideração restrições de deslocamento. Enquanto na segunda fase, a estrutura obtida na primeira fase foi equipada com amortecedores viscosos para realizar o controle da resposta dinâmica. Nesta fase é feita a otimização da capacidade dos amortecedores com o objetivo de respeitar o *drift* máximo definido pela norma. Finalmente, e após a realização dessas duas fases para o projeto ótimo do pórtico resistente à carga sísmica com o uso de amortecedores viscosos, é realizada uma breve comparação desse pórtico com um pórtico também resistente à mesma carga sísmica, mas sem o uso de amortecedores.

A seguir são descritos os detalhes para o desenvolvimento das fases 1 e 2 do exemplo ilustrativo do pórtico.

4.2 Fase 1: Otimização do Pórtico de Aço

Para a otimização do pórtico de aço foram utilizadas variáveis de projeto do tipo discreto. Para o exemplo numérico do pórtico de 7 andares foram usadas 4 variáveis de projeto para a otimização das vigas e colunas, cada variável de projeto define um conjunto de seções da estrutura, como foi mencionado no capítulo anterior. O vetor de variáveis de projeto é expresso como

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4] \quad (4.4)$$

onde a variável x_1 representa o tipo de seção das colunas dos andares 1, 2 e 3; a variável x_2 representa a seção dos andares 4, 5 e 6; a variável de projeto x_3 configura a seção do sétimo andar e a variável x_4 representa o tipo de seção de todas as vigas do pórtico. Isso é ilustrado na Figura 4.3.

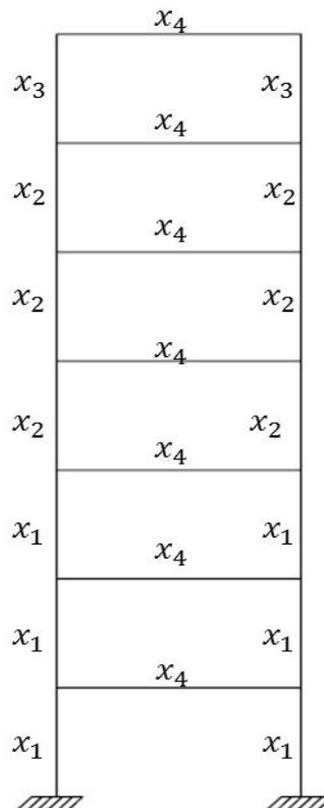


Figura 4.3 - Representação dos conjuntos de variáveis de projeto para otimizar o pórtico de aço.

Para a otimização das vigas e colunas do pórtico de aço foi usado um banco de dados de perfis estruturais de tipo W constituída por 105 perfis classificados por um número de ID inteiro em relação ao seu momento de inércia do menor para o maior. A Tabela 4.1 mostra o banco de dados de perfis usado.

Tabela 4.1 - Banco de dados de perfis estruturais W.

ID	Perfil	ID	Perfil	ID	Perfil	ID	Perfil	ID	Perfil
1	W14X22	22	W14X159	43	W24X162	64	W30X211	85	W36X260
2	W14X26	23	W24X76	44	W30X124	65	W36X170	86	W30X357
3	W14X30	24	W14X176	45	W14X370	66	W24X306	87	W36X280
4	W14X34	25	W24X84	46	W24X176	67	W14X605	88	W24X492
5	W14X38	26	W14X193	47	W30X132	68	W36X182	89	W36X300
6	W14X43	27	W14X211	48	W14X398	69	W30X235	90	W30X391
7	W14X48	28	W24X94	49	W24X192	70	W24X335	91	W36X328
8	W14X53	29	W24X103	50	W14X426	71	W36X194	92	W30X433
9	W14X61	30	W14X233	51	W30X148	72	W14X665	93	W36X359
10	W14X68	31	W24X104	52	W24X207	73	W30X261	94	W30X477
11	W14X74	32	W14X257	53	W14X455	74	W36X210	95	W36X393
12	W14X82	33	W24X117	54	W24X229	75	W24X370	96	W30X526
13	W14X90	34	W30X90	55	W36X135	76	W14X730	97	W36X439
14	W14X99	35	W14X283	56	W30X173	77	W30X292	98	W30X581
15	W14X109	36	W30X99	57	W14X500	78	W36X232	99	W36X485
16	W24X55	37	W24X131	58	W24X250	79	W36X230	100	W36X527
17	W14X120	38	W14X311	59	W36X150	80	W24X408	101	W36X588
18	W14X132	39	W30X108	60	W30X191	81	W36X245	102	W36X650
19	W24X62	40	W24X146	61	W14X550	82	W30X326	103	W36X720
20	W14X145	41	W14X342	62	W24X279	83	W36X256	104	W36X798
21	W24X68	42	W30X116	63	W36X160	84	W24X450	105	W36X848

Para o presente exemplo e de acordo com a Tabela 4.1, o limite inferior das variáveis de projeto é 1 e o limite superior é o número de perfis no banco de dados, ou seja, 105.

Em relação aos parâmetros de entrada do algoritmo *Differential Evolution* para esta fase, foi utilizada uma população de 20 indivíduos. Essa população foi definida com base em um processo inicial de tentativa e erro. Para os parâmetros CR e F, como foi mencionado anteriormente, foram definidas regras de controle de parâmetros determinísticas para que mudem de valor à medida que o processo de otimização se desenvolve. O número de gerações (iterações) para a otimização do pórtico foi de 300 e foi realizada apenas uma execução.

Em resumo a Tabela 4.2 apresenta os parâmetros do algoritmo de otimização DE usados para otimizar o pórtico de aço.

Tabela 4.2 - Parâmetros de entrada do algoritmo DE para otimização do pórtico de aço.

Parâmetro	Port. 7 andares
População	20
Gerações	300
Execuções	1
CR	controle determinista
F	controle determinista

As restrições para otimizar o pórtico de aço foram definidas nas Equações 3.4 a 3.8 e a função objetivo está dada pela Equação 3.2.

4.3 Fase 2: Otimização de Amortecedores Viscosos

Após da obtenção de um pórtico otimizado e que respeite as restrições de deflexão, construtivas, de esbeltez, SC/WB e de carga, este pórtico é equipado com amortecedores viscosos em cada andar, ou seja, são instalados 7 amortecedores viscosos como é mostrado na Figura 4.4. Para otimizar os amortecedores foram usadas variáveis contínuas e as variáveis de projeto consideradas foram as constantes de amortecimento c de cada amortecedor. Por esse motivo, o processo teve 7 variáveis de projeto. O vetor de variáveis de projeto é expresso como

$$\mathbf{x} = [c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4 \ c_5 \ c_6 \ c_7] \quad (4.5)$$

onde a variável c_1 representa a constante de amortecimento do amortecedor instalado no primeiro andar; c_2 representa a constante de amortecimento do amortecedor instalado no segundo andar e assim por diante. Na Figura 4.4 pode-se observar a posição e as variáveis de projeto consideradas para otimizar os amortecedores instalados no pórtico.

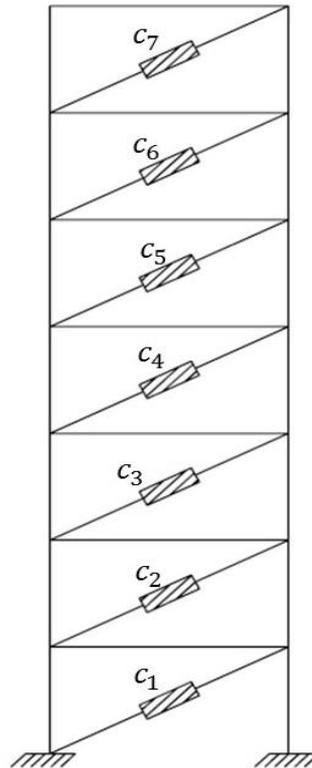


Figura 4.4 - Representação das variáveis de projeto para otimizar os amortecedores viscosos.

Os limites superior e inferior adotados para as variáveis de projeto na otimização foram $100 \frac{\text{Ns}}{\text{m}}$ e $4 \times 10^6 \frac{\text{Ns}}{\text{m}}$ respectivamente. A rigidez no material de Maxwell (*Maxwell model*) para a modelagem do amortecedor viscoso foi definida como $85 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}}$, usando um braço de suporte de $2,9 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.

Em relação aos parâmetros do DE para a otimização dos amortecedores, foi usada uma população de 30 definida por tentativa e erro. Os parâmetros CR e F para esta fase também foram definidos por um controle de parâmetros determinista. O processo de otimização foi realizado com 400 gerações e foi executado apenas uma vez. Na Tabela 4.3 apresenta-se um resumo dos parâmetros do DE usados. Os processos de otimização foram executados apenas uma vez devido ao alto custo computacional do processo, mas podem ser realizadas mais execuções para obter resultados mais precisos.

Tabela 4.3 - Parâmetros de entrada do algoritmo DE para otimização dos amortecedores viscosos na estrutura.

Parâmetro	Port. 7 andares
População	30
Gerações	400
Execuções	1
CR	controle determinista
F	controle determinista

O processo de otimização dos amortecedores não teve restrições e a função objetivo foi focada em obter um deslocamento relativo entre andares máximo menor que 0,25% com uma capacidade de amortecimento viscoso ótima.

Após a aplicação da metodologia proposta, verificou-se que, com o uso de amortecedores viscosos para o controle da resposta dinâmica do pórtico de aço foi possível reduzir até 67,37% o deslocamento relativo entre andares máximo, conseguindo respeitar o limite de 0,25%. Por outro lado, em comparação com um pórtico resistente à carga sísmica sem uso de amortecedores e respeitando todas as restrições incluindo o *drift*, o pórtico equipado com amortecedores viscosos e atendendo aos mesmos requisitos, obteve uma economia de material de 70,6%. A seguir são apresentados os resultados da metodologia aplicada ao pórtico do exemplo.

4.4 Resultados

Para a otimização do pórtico de aço sem controle nos deslocamentos, o vetor de variáveis de projeto obtido ao final do processo foi:

$$\mathbf{x} = [28 \ 16 \ 1 \ 1] \quad (4.6)$$

Este vetor, de acordo com a atribuição das variáveis de projeto e do banco de dados, representa no pórtico os perfis mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resultado da otimização e perfis resultantes para os membros do pórtico de aço.

Variável	ID	Perfil
x_1	28	W24X94
x_2	16	W24X55
x_3	1	W14X22
x_4	1	W14X22
massa (kg)	5562,9	
custo comp. (s)	100398	

Com uma massa de 5562,9 kg, o pórtico de aço fica finalmente configurado como é mostrado na Figura 4.5.

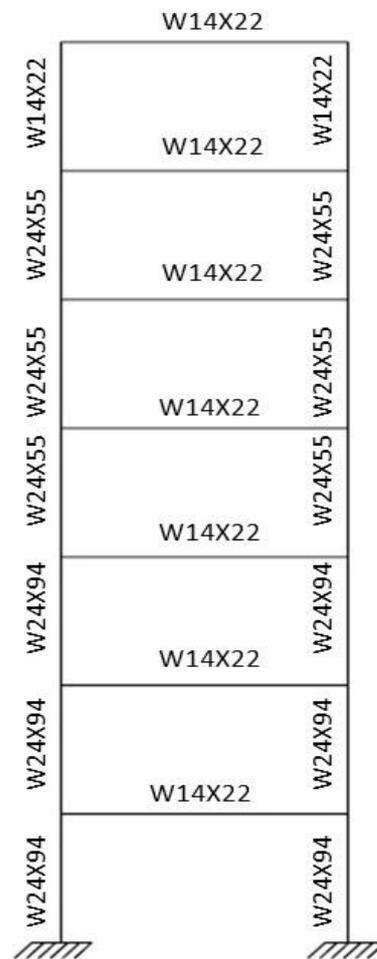


Figura 4.5 - Pórtico de aço otimizado sob carga sísmica sem controle de deslocamentos.

Em seguida, para o pórtico obtido na fase 1 (Figura 4.5) foram adicionados amortecedores viscosos para o controle dos deslocamentos com o fim de cumprir as

considerações de *drift* dadas pela norma, e foi realizada a otimização da capacidade de amortecimento dos dissipadores obtendo como resultado o vetor de variáveis de projeto:

$$\mathbf{x} = 10^6 \times [4 \quad 2,9957 \quad 3,9239 \quad 3,0585 \quad 2,4129 \quad 1,6355 \quad 0,8163] \quad (4.7)$$

Em resumo, a informação de cada amortecedor e da otimização é mostrada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resultado da otimização dos amortecedores viscosos.

Variável	$c \left(\frac{\text{Ns}}{\text{m}} \right)$
c_1	4×10^6
c_2	$2,9957 \times 10^6$
c_3	$3,9239 \times 10^6$
c_4	$3,0585 \times 10^6$
c_5	$2,4129 \times 10^6$
c_6	$1,6355 \times 10^6$
c_7	$0,8163 \times 10^6$
custo comp. (s)	512378

Nas Figuras 4.6 e 4.7 podem-se observar os gráficos de convergência das otimizações do pórtico e dos amortecedores, respectivamente.

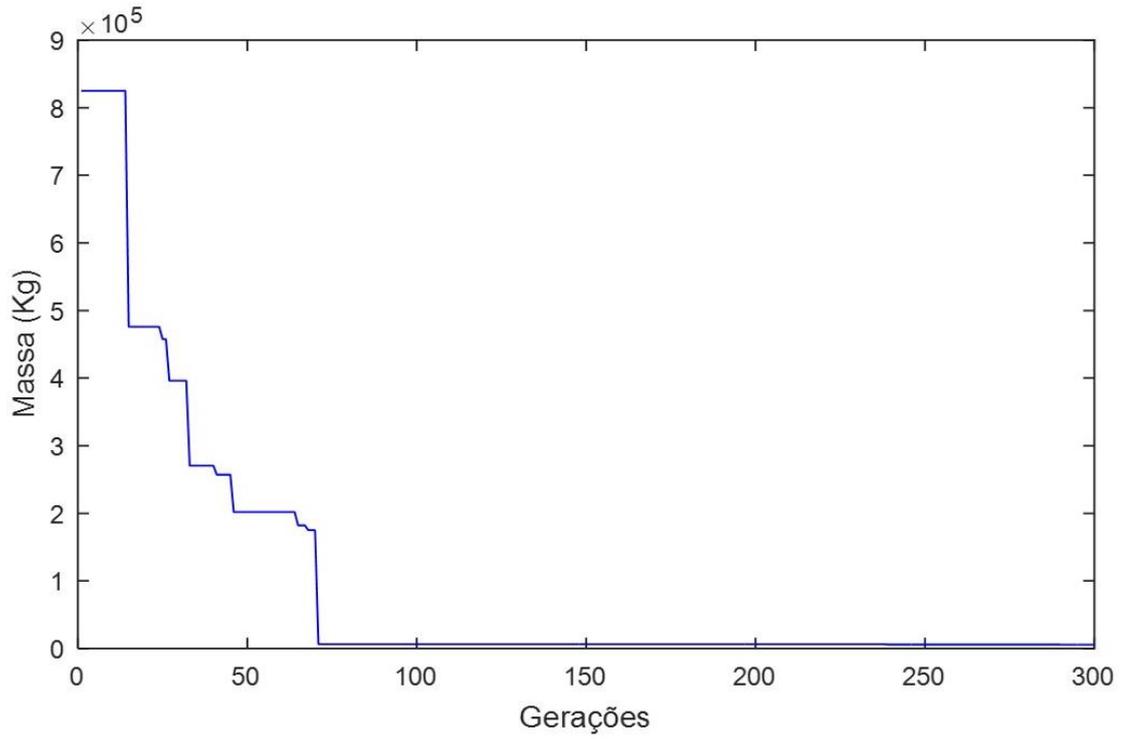


Figura 4.6 - Gráfico de convergência para a otimização do pórtico de aço.

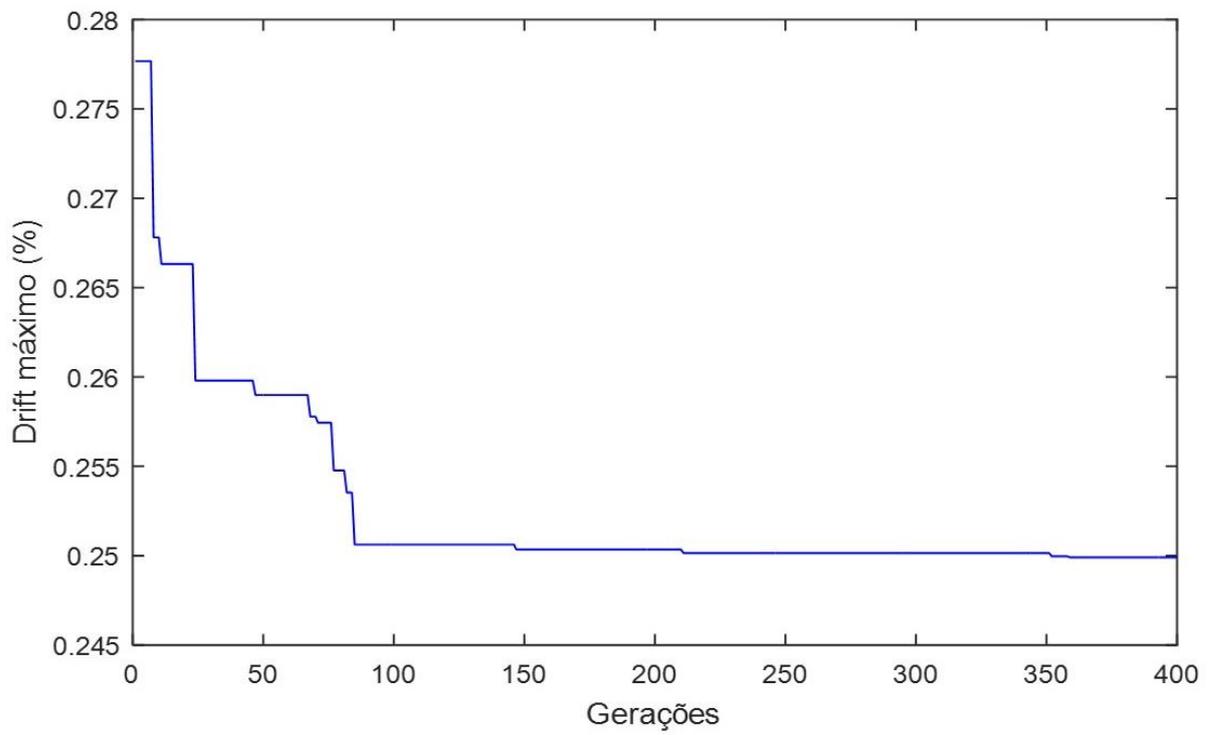


Figura 4.7 - Gráfico de convergência para a otimização dos amortecedores viscosos.

Na Figura 4.8 são apresentados os resultados do pórtico em termos do deslocamento relativo entre andares máximo (*drift* máximo) por andar da estrutura sem amortecedores e da estrutura equipada com 7 amortecedores viscosos.

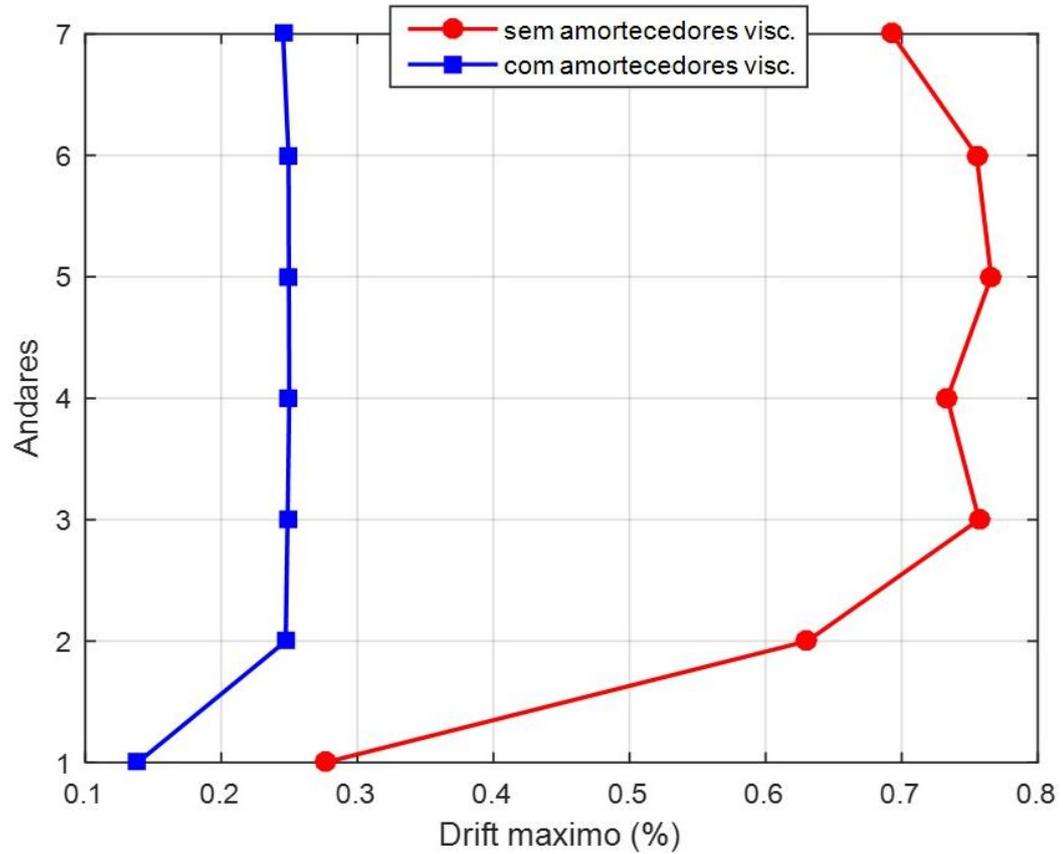


Figura 4.8 - Diagrama de *drift* máximo para pórtico de 7 andares sem amortecedores (curva vermelha) e equipado com amortecedores viscosos (curva azul).

A Figura 4.9 apresenta a resposta em termos de *drift* para o terceiro andar do pórtico sem amortecedores e com amortecedores viscosos otimizados.

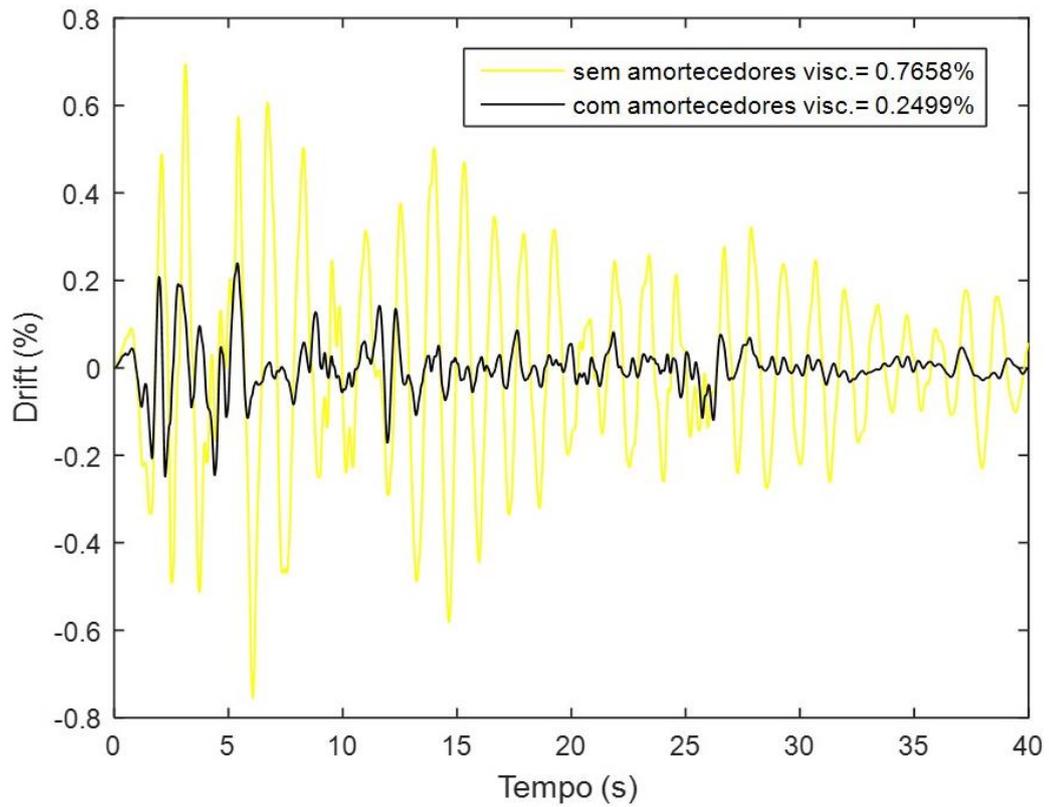


Figura 4.9 - *Drift* no terceiro andar da estrutura sem amortecedores (curva amarela) e com amortecedores viscosos otimizados (curva preta).

Na Tabela 4.6 apresenta-se a redução no *drift* máximo por cada andar após da instalação dos amortecedores viscosos otimizados.

Tabela 4.6 - Resposta do pórtico de 7 andares em termos de *drift* sob o sismo El Centro.

Andar	<i>Drift</i> máximo (%)		Redução (%)
	Sem amortecedores	Com amortecedores	
1	0,276	0,1384	49,86
2	0,6305	0,2473	60,78
3	0,7568	0,2487	67,14
4	0,7335	0,2499	65,93
5	0,7658	0,2496	67,41
6	0,755	0,2494	66,97
7	0,6927	0,2453	64,59

Além do já apresentado acima, para mostrar a eficácia da metodologia proposta na otimização dos amortecedores viscosos, foi comparada a configuração ótima obtida para os amortecedores apresentada anteriormente com uma configuração com maiores valores da constante de amortecimento c nos amortecedores de cada andar. A Tabela 4.7 mostra os valores ótimos da capacidade dos amortecedores obtidos na otimização e os valores mais altos com os quais foi comparada. A comparação foi feita utilizando o mesmo pórtico obtido na fase 1 e o mesmo valor de rigidez para os suportes dos amortecedores ($85 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}}$).

Tabela 4.7 - Valores ótimos e de teste da constante de amortecimento dos amortecedores por cada andar do pórtico de 7 andares.

Variável	Valores ótimos	Valores maiores
c_1	4×10^6	4×10^6
c_2	$2,9957 \times 10^6$	4×10^6
c_3	$3,9239 \times 10^6$	4×10^6
c_4	$3,0585 \times 10^6$	4×10^6
c_5	$2,4129 \times 10^6$	3×10^6
c_6	$1,6355 \times 10^6$	2×10^6
c_7	$0,8163 \times 10^6$	1×10^6

Na Figura 4.10 observa-se a comparação, em termos de *drift* máximo por cada andar, entre a solução ótima obtida e uma configuração com valores mais altos. Do gráfico pode-se determinar que a solução obtida por o processo de otimização é confiável.

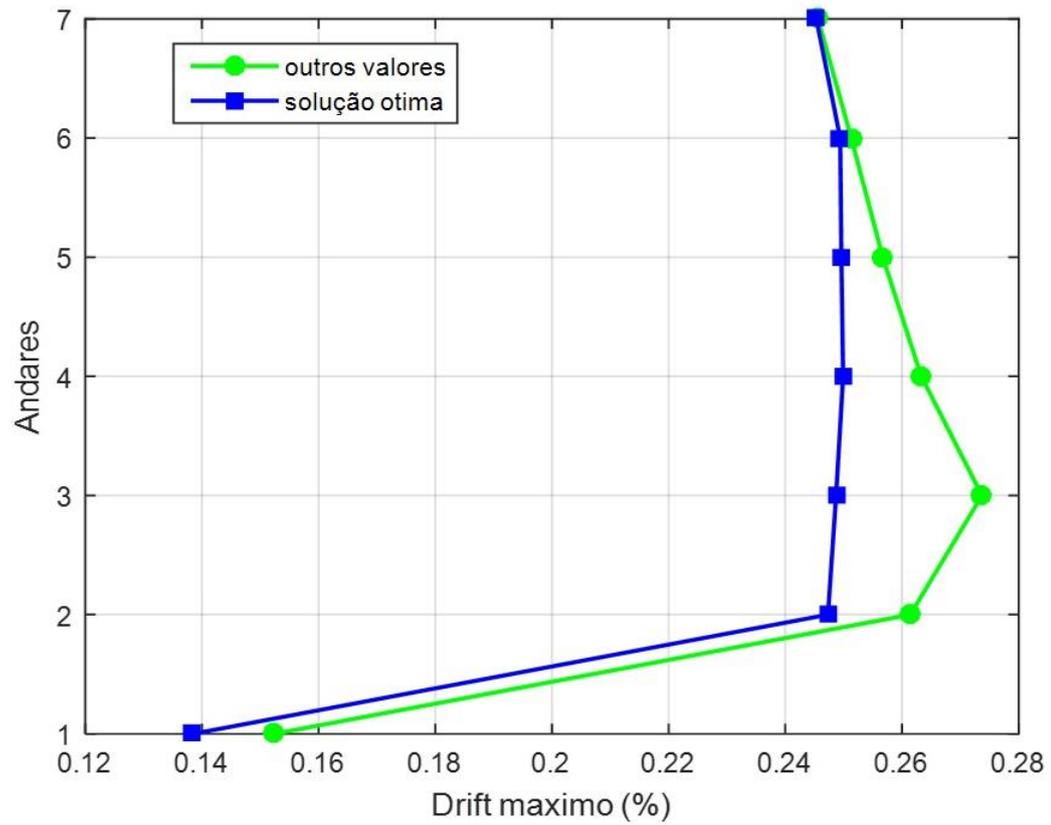


Figura 4.10 - Comparação em termos de *drift* máximo por andar entre o pórtico equipado com amortecedores otimizados (curva azul) e o mesmo pórtico com valores de amortecimento mais altos (curva verde).

Agora analisando os deslocamentos de cada andar do pórtico, na Figura 4.11 é possível observar a resposta do pórtico sob a ação do sismo El Centro em termos do deslocamento máximo por cada andar sem amortecedores e com amortecedores viscosos.

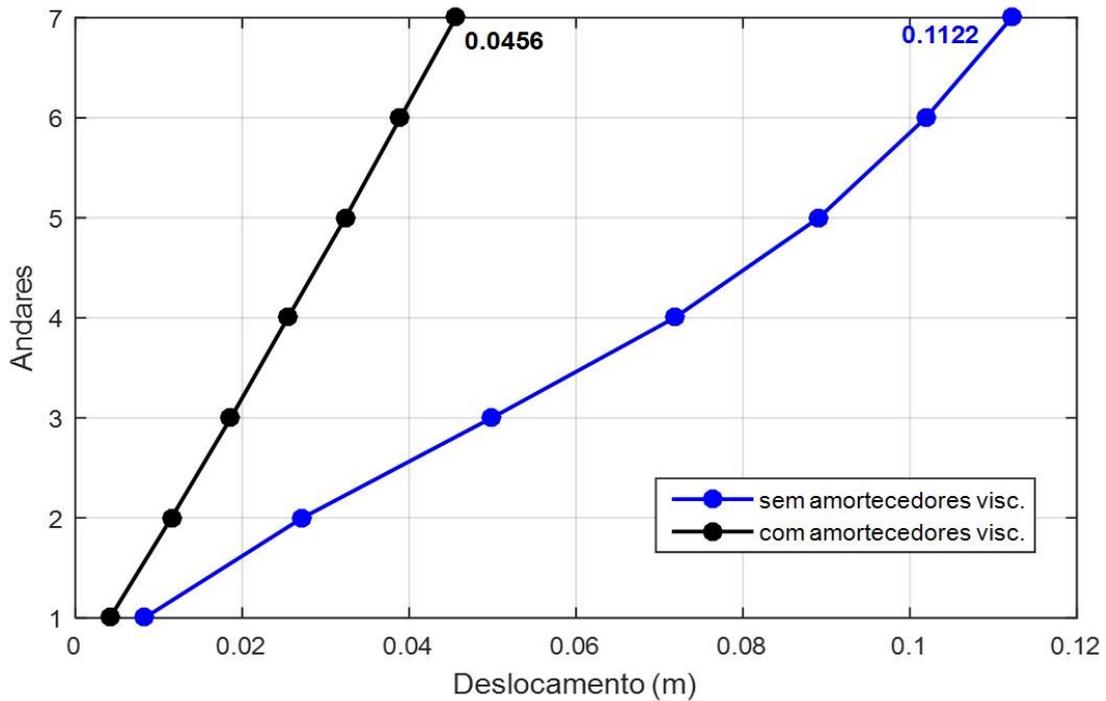


Figura 4.11 - Resposta da estrutura em termos do deslocamento máximo por cada andar sem amortecedores (curva azul) e com amortecedores viscosos (curva preta).

Da Figura 4.11 pode-se analisar que foi possível obter uma redução importante nos deslocamentos de cada andar do pórtico a partir da instalação dos amortecedores viscosos na estrutura. Os valores da redução do deslocamento por cada andar podem-se observar em detalhe na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Resposta do pórtico e 7 andares em termos do deslocamento máximo por cada andar do pórtico submetido ao sismo El Centro.

Andar	Deslocamento máximo (m)		Redução (%)
	Sem amortecedores	Com amortecedores	
1	0,0083	0,0042	49,4
2	0,0272	0,0115	57,72
3	0,0499	0,0186	62,73
4	0,0718	0,0255	64,48
5	0,0891	0,0324	63,64
6	0,1019	0,039	61,73
7	0,1122	0,0456	59,36

Com o objetivo de observar algumas das propriedades concedidas ao pórtico devido ao uso dos amortecedores viscosos, foi realizada uma comparação do pórtico otimizado equipado com amortecedores viscosos ótimos, obtido aplicando a metodologia proposta, contra um pórtico otimizado respeitando também todas as restrições dadas pela norma incluindo o *drift* ($\leq 0.25\%$) mas sem a utilização de amortecedores.

Para a otimização do pórtico de aço levando em consideração a restrição de *drift* foi usado o banco de dados da Tabela 4.1 e os parâmetros para o algoritmo DE foram os mesmos que na otimização do pórtico sem restrição de *drift* da fase 1. O vetor de variáveis de projeto obtido para este pórtico foi:

$$\mathbf{x} = [71 \ 26 \ 40 \ 42] \quad (4.8)$$

A configuração deste pórtico de acordo com os valores obtidos é apresentada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Resultado da otimização do pórtico de aço com a restrição de *drift*.

Variável	ID	Perfil
x_1	71	W36X194
x_2	26	W14X193
x_3	40	W24X146
x_4	42	W30X116
massa (kg)	18921	
custo comp. (s)	111427	

A Tabela 4.10 mostra alguns valores de resultados observados no pórtico resistente à carga sísmica com amortecedores viscosos e no pórtico resistente a sismo sem amortecedores. Pode-se perceber da Tabela 4.10, que para um controle ligeiramente abaixo de 0,25% de *drift* máximo nos dois pórticos, com o uso de amortecedores, foi possível economizar mais de 70% do material necessário para suportar a carga sísmica sem o uso deles. Também é possível dizer que, com o uso de amortecedores viscosos, as acelerações na estrutura diminuem consideravelmente.

Tabela 4.10 - Resultados comparativos entre o pórtico resistente à carga sísmica com amortecedores viscosos e sem amortecedores.

Resultado	Sem amortecedores	Com amortecedores
<i>Drift máximo (%)</i>	0,2471	0,2499
Massa do pórtico (kg)	18921	5562,9
Aceleração máx. (m/s²)	9,8814	6,3596

Na Figura 4.12 apresenta-se a aceleração por cada piso do pórtico resistente à carga sísmica com amortecedores viscosos e sem eles. Nela pode-se ver que o uso de amortecedores consegue reduzir significativamente as acelerações em relação a um pórtico que também respeita todas as restrições, mas sem o uso de amortecedores.

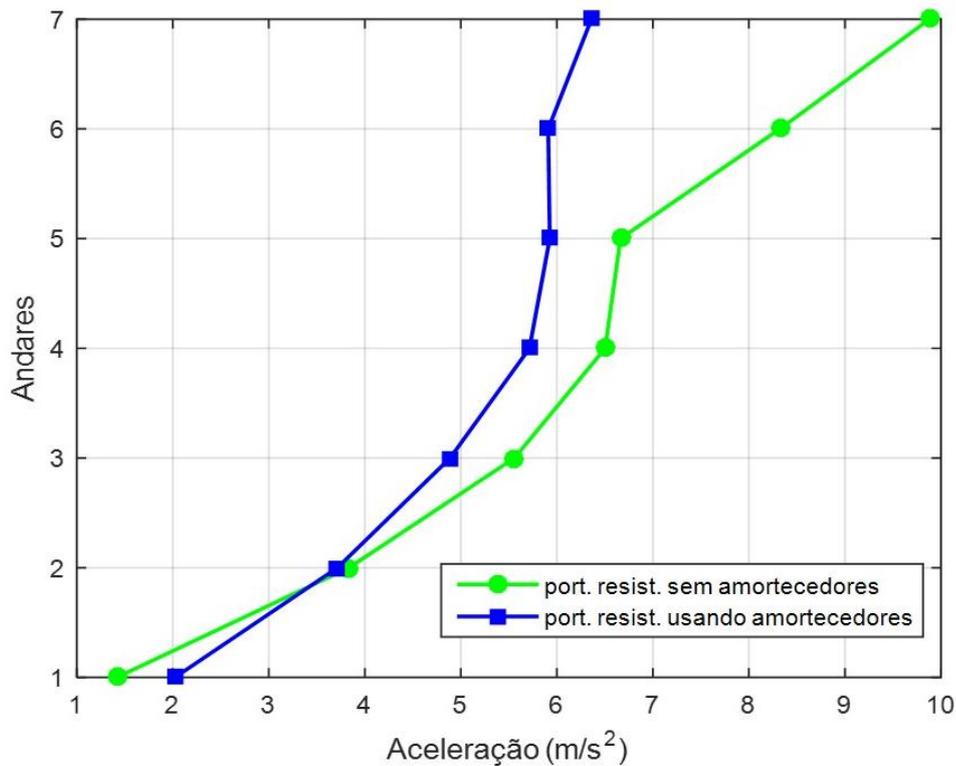


Figura 4.12 - Aceleração por cada andar dos pórticos resistentes à carga sísmica usando amortecedores viscosos (curva azul) e sem o uso de amortecedores (curva verde).

Na Tabela 4.11 apresenta-se a redução da aceleração no pórtico devido ao uso de amortecedores viscosos para o controle da resposta dinâmica em relação ao pórtico resistente ao sismo sem utilizar amortecedores.

Tabela 4.11 - Aceleração por andar dos pórticos resistentes a carga sísmica com uso de amortecedores viscosos e sem eles.

Andar	Aceleração máxima (m/s²)		Redução (%)
	Sem amortecedores	Com amortecedores	
1	1,4155	2,021	-42,78
2	3,8349	3,7146	3,14
3	5,5573	4,8874	12,05
4	6,5025	5,714	12,13
5	6,662	5,9257	11,05
6	8,3219	5,9093	28,99
7	9,8814	6,3596	35,64

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusões Finais

Embora atualmente o uso de amortecedores externos nas estruturas seja muito comum no controle de vibrações, a otimização desses amortecedores ainda é uma área relativamente nova, com muitas variantes para estudar. Neste contexto, o presente trabalho apresentou um método para otimizar a capacidade de amortecimento de amortecedores viscosos instalados em uma estrutura de aço submetida à excitação sísmica. Esta metodologia foi desenvolvida usando o algoritmo meta-heurístico *Differential Evolution*, o qual permite resolver problemas de variável contínua e discreta.

A metodologia proposta foi aplicada a um pórtico de 7 andares e 1 vão com o objetivo de ilustrar o processo. O trabalho foi realizado em duas fases. Na primeira fase foi feita a otimização do pórtico de aço de 7 andares submetido ao sismo El Centro sem controle dos deslocamentos, e na segunda fase este mesmo pórtico já otimizado foi equipado com amortecedores viscosos para controlar o efeito da excitação sísmica e obter deslocamentos dentro do especificado pela norma. A realização do processo em duas etapas ofereceu tempos computacionais aceitáveis, além de bons resultados em termos de otimização.

Os resultados das simulações numéricas mostraram que o algoritmo DE ofereceu uma convergência muito boa na otimização do pórtico de aço e dos amortecedores viscosos, ou seja, o DE apresentou uma grande capacidade para encontrar soluções ótimas com o uso do controle de parâmetros determinista usado.

Foi observado também que com o uso de amortecedores viscosos otimizados na estrutura foi possível reduzir até 67,37% o *drift* máximo para cumprir com a restrição de deslocamento relativo entre andares, o que representa um valor consideravelmente bom.

Em termos de aceleração, observou-se que o uso de amortecedores viscosos para o controle de vibrações é muito mais conveniente do que os métodos clássicos (onde, em vez de usar dispositivos externos para resistir às cargas dinâmicas, é usada a rigidez e elasticidade da própria estrutura), pois reduzem em maior medida as acelerações em cada andar do pórtico. Além disso, com o uso de amortecedores viscosos para resistir à carga sísmica foi economizada uma grande quantidade de material (aço para o presente estudo). A massa do pórtico sem

amortecedores foi reduzida para menos de $1/3$ do seu valor no caso do pórtico com os amortecedores, e em ambos os casos todas as restrições foram respeitadas.

Pode-se concluir também que os amortecedores viscosos com amortecimentos muito altos nem sempre consegue dissipar mais energia quando é levada em consideração a rigidez do suporte dos amortecedores.

A metodologia proposta no presente trabalho pode ser aplicada ao projeto de novas estruturas resistentes a carga sísmica usando amortecedores viscosos em cada andar. Para um projeto mais realista a metodologia também pode ser aplicada em estruturas 3D. Para projeto de estruturas sem uso de amortecedores pode ser aplicada a etapa 1 do método, mas incluindo também a restrição de deslocamento no processo de otimização. E analogamente a segunda etapa da metodologia pode ser aplicada a estruturas já existentes com o intuito de limitar os deslocamentos relativos entre andares quando é submetida a excitação sísmica.

5.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

- Considerar outras funções objetivo como por exemplo o valor econômico total real da estrutura equipada com amortecedores.
- Realizar a otimização simultânea do pórtico de aço e os amortecedores viscosos.
- Determinar o número e posições ótimas dos amortecedores na estrutura.
- Realizar um estudo levando em consideração os tipos de ameaça sísmica definidos no capítulo 18 da norma para projeto sísmico de estruturas ASCE 7 -16.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahumada V., J. L. Sistemas de Control en Estructuras, **Revista Inge-CUC**, vol. 6, p. 79–84, 2010.
- Alba, E. **Parallel metaheuristics : a new class of algorithms**. John Wiley, 2005.
- Alfonso, H., Salto, C., Minetti, G. F., Stark, N., Bermúdez, C., Orellana, A., e Graglia, P. Algoritmos metaheurísticos para optimización y aplicación a problemas NP completos, **XI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación**, Argentina, 2009.
- Alonso, S. (2004). **Breve manual de Tcl**. http://xlb.es/breve_manual_tcl.pdf, 2004, Acesso em: 27-09-2017.
- American Institute of Steel Construction. **Manual of Steel Construction, Load & Resistance Factor Design**. New York, 1st edition, 1986.
- American Institute of Steel Construction. **Seismic Provisions for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 341-16**. Chicago, Illinois, 2016.
- American Institute of Steel Construction. **Specification for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 360-16**. Chicago, Illinois, 2016.
- Borges, R. **Controle Semi-Ativo de Vibrações em Estruturas Utilizando Amortecedor Magnetorreológico**. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 2009.
- Camp, C. V., Bichon, B. J., e Stovall, S. P. Design of Steel Frames Using Ant Colony Optimization, **Journal of Structural Engineering**, vol. 131, p. 369–379, 2005.
- Carbas, S. Design optimization of steel frames using an enhanced firefly algorithm, **Engineering Optimization**, vol. 48, p. 2007–2025, 2016.
- Carrillo Cubillas, M. M. **Paquete de Cálculo de Diseño de Columnas de Concreto Reforzado**. Tese de graduação, Universidad de las Américas Puebla, 2004.
- Cedillo, J., e Ramírez, M. Programación Básica de Interfaces de Usuario Utilizando TCL, **Polibits [en línea]**, vol. 32, p. 22–28, 2005.
- Choi, S. W., e Park, H. S. Multi-objective seismic design method for ensuring beam-hinging mechanism in steel frames, **Journal of Constructional Steel Research**, vol. 74, p. 17–25, 2012. doi:10.1016/j.jcsr.2012.01.012
- Christensen, P. W., e Klarbring, A. **An introduction to structural optimization**. Springer, 2009.
- Committee AISC. **Load and resistance factor design: manual of steel construction**, 2001.
- Lobo, F. J., Lima, C. F., e Michalewicz, Z. (Ed.). **Parameter setting in evolutionary**

algorithms. Springer, Berlin, Heidelberg, vol. 54, 2007.

Farshchin, M., Maniat, M., Camp, C. V., e Pezeshk, S. School based optimization algorithm for design of steel frames. **Engineering Structures**, vol. 171, p. 326–335, 2018.

Gandelli, E., Penati, M., Quaglini, V., Lomiento, G., Miglio, E., e Benzoni, G. M. A novel OpenSees element for single curved surface sliding isolators. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, vol. 119, p. 433–453, 2019

Gong, Y. Design optimization of steel moment frames under extreme earthquake loading. **Advanced Steel Construction**, vol. 3, p. 485–511, 2007.

Guilherme, L. **Estudo de Estratégias de Controlo Activo de Vibrações Para um Edifício de Dois Andares**. Dissertação de mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2011.

Haftka, R. T., e Gürdal, Z. **Elements of Structural Optimization**. Springer, Netherlands, 1992.

Jalili, N. (2010). **Piezoelectric-Based Vibration-Control : from macro to micro/nano scale systems**. Springer, Boston, 2010.

Jiang, J., e Usmani, A. Modeling of steel frame structures in fire using OpenSees, **Computers & Structures**, vol. 118, p. 90–99, 2013.

Kaveh, A., Bakhshpoori, T., e Azimi, M. Seismic optimal design of 3D steel frames using cuckoo search algorithm. **The Structural Design of Tall and Special Buildings**, vol. 24(3), p. 210–227, 2014.

Kirsch, U. **Structural Optimization : Fundamentals and Applications**. Springer, Berlin, 1993.

Koziel, S., e Yang, X.-S. **Computational Optimization, Methods and Algorithms**, Springer, Berlin, 2011.

Lee, D., e Taylor, D. P. Viscous damper development and future trends, **The Structural Design of Tall Buildings**, vol. 10(5), p. 311–320, 2001.

Lu, X., Xie, L., Guan, H., Huang, Y., e Lu, X. A shear wall element for nonlinear seismic analysis of super-tall buildings using OpenSees, **Finite Elements in Analysis and Design**, vol. 98, p. 14–25, 2015.

Marshall, J. D., e Charney, F. A. A hybrid passive control device for steel structures, I: Development and analysis, **Journal of Constructional Steel Research**, vol. 66, p. 1278–1286, 2010.

Martinez-Rodrigo, M., e Romero, M. L. An optimum retrofit strategy for moment resisting frames with nonlinear viscous dampers for seismic applications, **Engineering Structures**, vol. 25(7), p. 913–925, 2003.

Martínez, C. A. **Diseño Óptimo de Sistemas Pasivos de Disipación de Energía en Estructuras Bajo Excitación Sísmica**. Dissertação de mestrado, Universidad Nacional de Cuyo, 2012.

McNamara, R. J., e Taylor, D. P. Fluid viscous dampers for high-rise buildings, **The Structural Design of Tall and Special Buildings**, vol. 12(2), p. 145–154, 2003.

Miguel, L. F. F., Lopez, R. H., e Miguel, L. F. F. Multimodal size, shape, and topology optimisation of truss structures using the Firefly algorithm, **Advances in Engineering Software**, vol. 56, p. 23–37, 2013.

Moradpour, S., e Dehestani, M, Optimal DDBD procedure for designing steel structures with nonlinear fluid viscous dampers, **Structures**, vol. 22, p. 154–174, 2019.

Nocedal, J., e Wright, S. J. **Numerical optimization**. Springer, 2006.

Parcianello, E., Chisari, C., e Amadio, C, Optimal design of nonlinear viscous dampers for frame structures, **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, vol. 100, p. 257–260, 2017.

Pezeshk, S., Camp, C. V., e Chen, D, Design of Nonlinear Framed Structures Using Genetic Optimization, **Journal of Structural Engineering**, vol. 126(3), p. 382–388, 2000.

Pollini, N., Lavan, O., e Amir, O, Towards realistic minimum-cost optimization of viscous fluid dampers for seismic retrofitting, **Bulletin of Earthquake Engineering**, vol. 14(3), p. 971–998, 2016.

Pollini, N., Lavan, O., e Amir, O, Minimum-cost optimization of nonlinear fluid viscous dampers and their supporting members for seismic retrofitting, **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, vol. 46(12), p. 1941–1961, 2017.

Romo, L. **Diagnóstico de Daño en Disipadores de Energia Histeréticos Tipo WDP Para el Control Pasivo en Estructuras Sismorresistentes Mediante Análisis de Vibraciones en el Dominio de la Frecuencia**. Tese de doutorado, Universidad de Granada, 2012.

Sepehri, A., Taghikhany, T., e Ahmadi Namin, S. M. R, Seismic design and assessment of structures with viscous dampers at limit state levels: Focus on probability of damage in devices, **The Structural Design of Tall and Special Buildings**, vol. 28(1), p. e1569, 2019.

Soriano, H. L. (2014). **Introdução à Dinâmica das Estruturas**. Elsevier, Rio de Janeiro, 2014.

Spencer Jr, B. F, State of the Art of Structural Control, **Journal of Structural Engineering**, vol. 129, p. 845–856, 2003.

Spencer Jr, B. F., e Soong, T. T, New applications and development of active, semi-

active and hybrid control techniques for seismic and non-seismic vibration in the usa. In **Proceedings of International Post-SMiRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structures**. Cheju, Korea, 1999.

Storn, R, Differential Evolution Research – Trends and Open Questions, **Advances in Differential Evolution**, vol. 143, p. 1–31, 2008.

Storn, R., e Price, K, Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces, **Journal of Global Optimization**, vol. 11, p. 341–359, 1997.

Symans, M. D., Charney, F. A., Whittaker, A. S., Constantinou, M. C., Kircher, C. A., Johnson, M. W., e McNamara, R. J, Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments, **Journal of Structural Engineering**, vol. 134(1), p. 3–21, 2008.

Symans, M. D., e Constantinou, M. C, Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review, **Engineering Structures**, vol. 21, p. 469–487, 1999.

Villarreal C., G., e Díaz la Rosa S., M. **Edificaciones con Disipadores Viscosos**. Lima, Perú, 2016

Vu, A. T., e Wener, F, Optimization of steel frame structures based on differential evolution algorithm, In **18th International Conference on the Application of Computer**. Weimar, 2009.

Yang, X.-S. **Engineering optimization : an introduction with metaheuristic applications**. John Wiley, New Jersey, 2010.

Yang, X.-S. **Nature-inspired optimization algorithms**, Elsevier, London, 2014.