

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

OTIMIZAÇÃO DE UM DISSIPADOR DE ENERGIA METÁLICO CILÍNDRICO
RANHURADO

por

Diego Henao Leon

Dissertação para obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 23 de Abril de 2021.

OTIMIZAÇÃO DE UM DISSIPADOR DE ENERGIA METÁLICO CILÍNDRICO
RANHURADO

por

Diego Henao Leon

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. Dr. Letícia Fleck Fadel Miguel

Coorientador: Prof. Dr. Jesus Daniel Villalba Morales

Aprovada por :

Prof. Dr. Orlando Arroyo Amell, Universidad de La Sabana / Colômbia

Prof. Dr. José Elias Laier, PPGSET / EESC / USP

Prof. Dr. Rogério José Marczak, PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 23 de abril de 2021.

À minha família, por todo o amor e apoio que sempre me deram

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente à vida por me permitir alcançar este objetivo, à minha família, minha namorada e outras pessoas que me apoiaram, especialmente Alexandra Santos pelo seu apoio incondicional desde o primeiro momento.

Aos meus orientadores Prof. Leticia Fleck Fadel e Prof. Jesus Daniel Villalba pela dedicação e apoio constante durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Pontifícia Universidad Javeriana de Colômbia por permitir o uso de seus equipamentos para a realização das simulações.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo apoio financeiro durante todas as fases do processo.

RESUMO

Dissipadores metálicos são dispositivos de proteção estrutural que dissipam energia através do mecanismo de deformação plástica dos metais. Esses dispositivos fazem parte de sistemas de dissipação de energia passiva e têm como objetivo proteger os principais componentes estruturais dos efeitos nocivos causados por excitações dinâmicas como eventos sísmicos ou fortes rajadas de vento. Este estudo descreve o processo de otimização da forma de um dissipador de energia metálico cilíndrico vazado ranhurado. Para o seu desenvolvimento foram elaboradas 5 configurações iniciais com 5 tipos diferentes de ranhuras, permitindo determinar de qual configuração o melhor modelo otimizado é obtido. Para o processo de otimização, é elaborado um código computacional utilizando a linguagem de programação Python, o qual contém as instruções a serem executadas no *software* de elementos finitos Abaqus. Além de conter as instruções para a geração do modelo e sua análise em elementos finitos, o código desenvolvido contém as instruções do algoritmo *Simulated Annealing* e as heurísticas de mudança, cabendo ao algoritmo comparar a energia dissipada por dois modelos, dependendo do critério de aceitação, uma configuração é selecionada e submetida às heurísticas de mudança de forma para gerar uma nova configuração alterando o material dos elementos de acordo com os valores de tensão obtidos. A partir dos resultados obtidos, determinou-se que através do processo de otimização proposto é possível obter modelos otimizados com comportamento histerético estável e com uma capacidade de dissipação de energia significativamente maior que os modelos iniciais. Finalmente determinou-se que através de ranhuras do tipo vertical é possível obter um modelo otimizado com maior capacidade de dissipação de energia e usando menos iterações no processo de otimização.

Palavras-chaves: Proteção estrutural; Dissipação passiva de energia; Dissipadores metálicos; *Simulated Annealing*; Otimização.

ABSTRACT

Metal sinks are structural protection devices that dissipate energy through the plastic deformation mechanism of metals. These devices are part of passive energy dissipation systems and aim to protect the main structural components from the harmful effects that can cause dynamic excitations such as events seismic or strong gusts of wind. This study describes the optimization process of the shape of a metallic cylindrical plate damper. For its development, 5 initial configurations were elaborated with 5 different types of slits to determine from which configuration the best optimized model is obtained. For the optimization process, a code is elaborated using the Python programming language, the code contains the instructions to be executed in the Abaqus finite element software. In addition to containing the instructions for the generation of the model and its analysis in finite elements, the code contains the instructions of the Simulated Annealing algorithm and the change heuristics, and the algorithm must compare the energy dissipated by two models, depending on the acceptance criteria, a configuration is selected and subjected to shape change heuristics to generate a new configuration by changing the material of the elements according to the stress values obtained. From the results obtained, it was determined that through the proposed optimization process it is possible to obtain optimized models with stable hysteretic behavior and with a significantly higher energy dissipation capacity than the initial models. It was finally determined that through slits of the type vertical is possible to obtain the optimized model with greater energy capacity and using fewer iterations in the optimization process.

Keywords: Vibration control systems, Passive energy dissipation, Metallic dissipators, Vertical pipe steel damper, Simulated Annealing, Optimization.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Organização do Trabalho	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1 Sistemas de Controle de Vibrações	4
2.2 Controle Passivo de Energia.....	5
2.2.1 Dissipadores de Fricção	7
2.2.2 Dissipadores de Fluido Viscoso	7
2.2.3 Dissipadores Viscoelásticos	8
2.2.4 Dissipadores de Massa Sincronizados	8
2.3 Operação de Sistemas de Controle Passivos	8
2.4 Dissipadores Metálicos	11
2.4.1 Comportamento de Dissipadores de Metálicos	11
2.4.2 Classificação de Dissipadores Metálicos	13
2.4.3 Dissipadores de Aço	13
2.4.4 Dissipadores de Alumínio	15
2.4.5 Dissipadores de Chumbo.....	16
2.4.6 Dissipadores de Cobre	16
2.4.7 Dissipadores de Liga com Memória de Forma.....	16
2.4.8 Determinação do Comportamento de Histerese em Dissipadores Metálicos	16
2.5 Otimização.....	18

2.5.1	Formulação de um Problema de Otimização	19
2.5.2	Classificação de Problemas de Otimização	21
2.5.3	Otimização Aplicada ao Projeto Estrutural	24
2.6	Metaheurísticas	26
2.6.1	Classificação de Algoritmos Metaheurísticos	27
2.6.2	Metaheurísticas Modernas.....	28
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	40
3.1	Dissipadores Metálicos	40
3.2	Aplicação de Algoritmos Metaheurísticos para Otimização de Amortecedores	49
3.3	Otimização de Dissipadores Metálicos	51
4.	METODOLOGIA PROPOSTA	57
4.1	Formulação do Problema de Otimização	59
4.1.1	Parâmetros	60
4.1.2	Variáveis de Projeto	65
4.1.3	Função Objetivo	66
4.1.4	Restrições	67
4.1.5	Equacionamento do Problema de Otimização.....	68
4.2	<i>Simulated Annealing</i>	68
4.3	Heurísticas de Modificação	69
4.4	Descrição do Código de Otimização Desenvolvido	73
4.4.1	Importação dos Módulos.....	73
4.4.2	Arranjos Numéricos Necessários.....	73
4.4.3	Criação das Funções para o Algoritmo de Otimização e Heurísticas	74

4.4.4 Criação de Dispositivo	74
4.4.5 Criação de Materiais e Atribuição	74
4.4.6 Seleção do Tipo de Análise e Solicitação das Variáveis de Interesse	75
4.4.7 Atribuição de Condições de Limite e Aplicação de Carga	75
4.4.8 Geração de Malha	76
4.4.9 Executar a Análise e Extrair os Resultados.....	77
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	78
5.1 Conceitos Usados na Apresentação dos Resultados	79
5.1.1 Apresentação dos Modelos Otimizados	79
5.1.2 Nomenclatura dos Modelos Otimizados	80
5.2 Capacidade de Dissipação de Energia e Evolução do Processo de Otimização	81
5.1 Distribuições de Tensões.....	91
5.2 Ciclos de Histerese dos Dissipadores Metálicos Cilíndricos Ranhurados	95
5.3 Relação Dissipação de Energia / Massa.....	98
6. CONCLUSÕES	100
6.1 Sugestões para Trabalho Futuros.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Representação da instalação do um dissipador num pórtico [Adaptado de Symas et al., 2008].....	10
Figura 2.2 Comportamento de um dissipador metálico em uma estrutura [Adaptado de Tenura et al.,2015].....	12
Figura 2.3 Comparação do comportamento de metais sob carga cíclica	13
Figura 2.4 Primeiros modelos de dissipadores metálicos propostos por Kelly et al., 1972. a) dissipadores em forma de U b) dissipadores torcionais c) dissipadores flexíveis [Adaptado de Javanmardi et al., 2019].....	14
Figura 2.5 Dissipadores metálicos a) ADAS b) TADAS c) VPD	15
Figura 2.6 Viga sob a carga concentrada [Adaptada de Rao, 2010].....	22
Figura 2.7 Classificação de Problemas de Otimização [Adaptado de Xin,2010].....	24
Figura 2.8 a) Original b) Otimização de parâmetros c) Otimização de forma d) Otimização topológica para uma placa.....	25
Figura 2.9 a) Original b) Otimização de parâmetros c) Otimização de forma d) Otimização topológica para treliça	26
Figura 2.10 Modelo de algoritmo genético	30
Figura 2.11 Diagrama de cruzamento em um ponto de cruzamento aleatório (localização) em algoritmos genéticos.	31
Figura 2.12 Representação esquemática da mutação em um único local, invertendo um bit selecionado aleatoriamente ($1 \rightarrow 0$)......	31

Figura 2.13	Modelo de algoritmo PSO	35
Figura 2.14	Modelo de algoritmo <i>Firefly</i>	37
Figura 3.1	Dissipadores metálicos Skinner et al.,.....	41
Figura 3.2	Dissipador de cisalhamento proposto por Nakashima et al.,.....	42
Figura 3.3	SSD proposto por Chan e Albernami	43
Figura 3.4	Dissipador YSPD proposto por Chan et al., 2009.....	44
Figura 3.5	Modelo de dissipador proposto por Maleki e Bagheri, 2010.....	45
Figura 3.6	Representação do dissipador de calor tubular vertical usado por Abebe et al., 2013	46
Figura 3.7	Dissipador SAFYD	47
Figura 3.8	Modos de falha do dissipador SPD de acordo com sua espessura	48
Figura 3.10	Distribuição de tensões no dissipador SSD	52
Figura 3.11	Tipos de orifícios tipos de furos usados no dissipador PYSPD.....	52
Figura 3.13	Configurações iniciais do dissipador de placa metálica	54
Figura 4.1	Dissipador de energia metálico cilíndrico vazado ranhurado	57
Figura 4.2	Fluxograma proposto para o processo de otimização para dissipador	58
Figura 4.3	Características geométricas do dissipador cilíndrico (dimensões em mm).	60
Figura 4.4	Relação tensão-deformação do aço utilizado.....	61
Figura 4.5	Condições de contorno	62

Figura 4.6	Representação do dissipador como uma placa plana	63
Figura 4.7	Distribuição de ranhuras circulares no dissipador	64
Figura 4.8	Dissipador original e modelos com ranhuras circular e quadradas.....	65
Figura 4.9	Modelo de dissipador e representação por matriz numérica	66
Figura 4.10	Conexão mediante um único nó.....	71
Figura 4.11	Áreas isoladas de material	71
Figura 4.12	Simetria do dissipador cilíndrico	72
Figura 4.13	Protocolo de carregamento	76
Figura 5.1	Modelos iniciais	78
Figura 5.3	Distribuição de tensões no modelo vertical	82
Figura 5.5	Comparação da forma do dispositivo inicial e do dispositivo otimizado.....	84
Figura 5.6	Evolução dissipador com ranhuras circulares.....	85
Figura 5.7	Comportamento do algoritmo de otimização Ranhuras circulares	86
Figura 5.8	Evolução dissipador com ranhuras quadradas	87
Figura 5.9	Comportamento do algoritmo de otimização Ranhuras quadradas	87
Figura 5.10	Evolução dissipador com ranhuras triangulares	88
Figura 5.11	Comportamento do algoritmo de otimização Ranhuras triangulares	89
Figura 5.12	Evolução dissipador com ranhuras horizontais.....	89
Figura 5.13	Comportamento do algoritmo de otimização Ranhuras horizontais.....	90

Figura 5.14	Evolução dissipador com ranhuras verticais.....	90
Figura 5.15	Comportamento do algoritmo de otimização Ranhuras verticais	91
Figura 5.16	Evolução da distribuição de tensões no modelo vertical até a obtenção do dispositivo TO2	92
Figura 5.17	Distribuição de tensões nos modelos iniciais	93
Figura 5.18	Distribuição de tensões nos modelos otimizados.....	94
Figura 5.19	Ciclo de histerese a) Modelo circular b) Modelo CO3	95
Figura 5.20	Ciclo de histerese a) Modelo Quadrado b) Modelo QO2.....	96
Figura 5.21	Ciclo de histerese a) Modelo Triangular b) Modelo TO3	96
Figura 5.22	Ciclo de histerese a) Modelo Horizontal b) Modelo HO1.....	97
Figura 5.23	Ciclo de histerese a) Modelo Vertical b) Modelo VO3.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1	Nomenclatura usada na apresentação dos modelos otimizados	81
Tabela 5.2	Dissipação de energia em cada execução do processo de otimização	81
Tabela 5.3	Comparação da eficiência dos modelos otimizados	99

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADAS	<i>Added Damping and Stiffness</i>
BESO	<i>Algorithm for Bi-directional Evolutionary Structural Optimization</i>
BRB	<i>Buckling Restrained Brace</i>
DM	<i>Damage Measure</i>
DPD	<i>Dual Pipe Damper</i>
EPS	<i>Equivalent Plastic Strain</i>
LYPS	<i>Low Yielding Point Steel</i>
PD	<i>Pipe Damper</i>
PYSPD	<i>Perforated Yielding Shear Panel Damper</i>
SA	<i>Simulated Annealing</i>
SAFYD	<i>Shear and Flexural Yielding Damper</i>
SPD	<i>Shear Panel Damper</i>

SSD *Steel Slit Damper*

TADAS *Triangular – Plate Added Damping and Stiffness*

YSPD *Yielding Shear Panel Damper*

LISTA DE SÍMBOLOS

a_i	Amplitude no i - th ciclo
a_m	Amplitude máxima
c	Coefficiente de amortecimento do sistema
du	Diferencial de deslocamento
$E_{Capacity}$	Capacidade de dissipação de energia da estrutura
E_D	Energia dissipada pelo amortecimento da estrutura
E_{Demand}	Demanda de capacidade de dissipação de energia
E_H	Energia dissipada no regime inelástico
E_I	Energia induzida ao sistema devido ao movimento sísmico
E_K	Energia cinética da massa da estrutura
E_P	Energia dissipada pela deformação plástica do dispositivo
E_S	Energia devida à deformação elástica do sistema
F	Força de resposta do dispositivo

k	Rigidez do sistema
m	Massa do sistema
p	Probabilidade do algoritmo Simulated Annealing
r	Valor numérico aleatório
T	Parâmetro de controle do algoritmo
x	Deslocamento do sistema
\dot{x}	Velocidade do sistema
\ddot{x}_g	Aceleração induzida ao sistema
Δf	Diferencia da funcione objetivo
e	Número de Euler
$\mu_{Capacity}$	Capacidade de ductilidade do sistema
μ_{Demand}	Demanda de capacidade de ductilidade do sistema
ρ	Fator de calibração de medição de dano

1. INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, a implementação de sistemas de controle de vibração em estruturas tem aumentado consideravelmente, isso em grande parte, devido a eventos catastróficos que geraram grandes perdas humanas e materiais. Um desses eventos foi o terremoto ocorrido no ano de 1995 no Japão conhecido como terremoto de Kobe, o qual apresentou uma magnitude de 7,2 na escala Richter e durou aproximadamente 20 segundos. Desde aquela data, o estudo, desenvolvimento e aplicação dos dispositivos de proteção sísmica teve um forte crescimento em escala global [Higashino e Okamoto, 2006].

Os sistemas de controle estrutural protegem as estruturas por meio de dispositivos adicionais que ajudam a controlar a resposta dinâmica da estrutura submetida a cargas dinâmicas induzidas por movimentos sísmicos, fortes rajadas de ventos ou tráfego veicular. Tais dispositivos podem contribuir na redução da amplitude de vibração, aumentando a capacidade de dissipação de energia da estrutura.

Os sistemas de controle são classificados em dois grandes grupos: sistemas de dissipação passiva de energia e sistemas de dissipação ativa de energia. Estes últimos são caracterizados por precisarem de fontes de energia externas para seu correto desempenho, este grupo também inclui o tipo híbrido e semi-ativos, os quais são sistemas de dissipação que são uma fusão entre o controle ativo e os dispositivos passivos.

Durante o processo de estudo e desenvolvimento de dispositivos de proteção estrutural, algumas ferramentas têm sido utilizadas para melhorar seu desempenho, uma delas são as técnicas de otimização. As técnicas de otimização aplicadas nos dissipadores visam melhorar a eficiência dos dispositivos, este objetivo geralmente pode ser alcançado mediante dois procedimentos, melhorando a distribuição dos dissipadores dentro da estrutura ou fazendo alterações na configuração do dispositivo até obter um modelo que proporcione melhor desempenho.

Assim, no presente trabalho é desenvolvido o processo de otimização da forma de um dissipador de energia metálico cilíndrico vazado ranhurado. O processo de otimização proposto é realizado utilizando o algoritmo *Simulated Annealing* SA (recozimento simulado) para selecionar as configurações a serem modificadas e utilizando heurísticas para gerar as alterações pertinentes a cada configuração.

1.1 Objetivos

O objetivo deste estudo é obter um modelo de dissipador de energia metálico cilíndrico vazado ranhurado que possua as melhores características de dissipação de energia para o protocolo de carregamento aplicado.

Para se atingir este objetivo, os seguintes objetivos específicos podem ser citados:

- Desenvolver um modelo parametrizado do dissipador metálico cilíndrico ranhurado usando Abaqus scripts;
- Elaborar código em Python para executar o processo de otimização, introduzindo o algoritmo SA e as heurísticas de modificação;
- Comparar os resultados obtidos e apresentar o comportamento dos modelos otimizados.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em 6 capítulos, sendo a introdução apresentada acima, o primeiro.

O Capítulo 2 aborda os conceitos teóricos utilizados no decorrer do trabalho de pesquisa, conceitos de controle estrutural, características e aplicações dos sistemas de controle de vibração e uma breve descrição de alguns algoritmos usados na área de otimização de estruturas.

O Capítulo 3 apresenta algumas das pesquisas realizadas no projeto e otimização de dissipadores metálicos, uma breve descrição do processo desenvolvido em cada um dos estudos de referência, os resultados obtidos em cada um dos trabalhos referenciados, e, por fim, alguns trabalhos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa sobre melhoramento da resposta estrutural usando algoritmos de otimização e sistemas de controle passivo de energia.

O Capítulo 4 aborda a metodologia usada para o desenvolvimento do processo de otimização proposto neste trabalho. Expõe cada uma das etapas necessárias no processo e descreve em detalhes as seções do código que tornam possível o processo de otimização de forma do dissipador de energia metálico cilíndrico vazado ranhurado.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos no processo de otimização, a evolução da forma dos modelos, a distribuição das tensões no dispositivo e a análise do comportamento histerético das configurações inicial e final.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões finais do trabalho e as sugestões para desenvolvimentos de futuros trabalhos relacionados a este estudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos dos tópicos envolvidos no desenvolvimento do processo de otimização de dissipadores cilíndricos ranhurados, conceitos sobre sistemas de dissipação de energia passiva, dissipadores metálicos e algoritmos de otimização.

2.1 Sistemas de Controle de Vibrações

Os sistemas de controle de vibrações têm a função de proteger as estruturas de possíveis danos causados por excitações dinâmicas. Os sistemas de controle incorporam dispositivos na estrutura que permitem reduzir as demandas de capacidade de dissipação de energia, ou diminuir a quantidade de energia que entra no edifício devido a um movimento sísmico.

Como foi apresentado anteriormente, os sistemas de controle estrutural são classificados como dispositivos de dissipação passiva de energia e de dissipação ativa de energia, a principal diferença entre eles está na forma como a energia que é introduzida na estrutura através da excitação dinâmica é dissipada pelos elementos que compõem o sistema de controle [Acevedo e Duque, 2009].

Os sistemas de controle ativo são dispositivos que fornecem forças no sistema estrutural por meio de atuadores que estão conectados a uma fonte externa de energia, as forças fornecidas por esses dispositivos podem ser utilizadas tanto para fornecer energia quanto para dissipá-la [Gomez et al., 2007], ao utilizar sensores e controladores, esses dispositivos atuam simultaneamente, uma vez que a excitação é percebida para fornecer uma melhor resposta estrutural [Soong e Spencer, 2002].

Dentro dos sistemas de controle ativo também existem os sistemas de controle híbrido e semiativo, os dispositivos pertencentes a esses grupos requerem menores quantidades de energia para seu funcionamento. Os sistemas de controle semiativo são uma extensão natural dos dispositivos passivos, esses mecanismos também são chamados de dissipadores controláveis ou inteligentes, pois incluem sistemas adicionais para aumentar a eficiência dos

dispositivos passivos, portanto, são considerados sistemas passivos controláveis, por outro lado, os sistemas de controle híbridos são mais eficientes do que o tipo passivo, além disso, são mais confiáveis e requerem menos energia externa do que o tipo ativo, pois não precisam de grandes forças de controle, porém, ainda é necessária uma quantidade significativa de energia suplementar [Christenson, 2001]. Esses dispositivos de controle híbrido são muito eficientes na proteção de estruturas submetidas a diferentes tipos de excitações com diferentes intensidades e frequências.

A seleção do tipo de sistema de controle estrutural é determinada, entre outras coisas, por fatores como a altura do edifício e a finalidade para a qual a estrutura foi construída [Acevedo e Duque, 2006; Saaed et al., 2013].

2.2 Controle Passivo de Energia

O dispositivo analisado neste trabalho é um dissipador pertencente a sistemas de dissipação passivos de energia, esses tipos de dispositivos são incluídos na estrutura para contribuir com a capacidade de dissipação de energia, sua principal função é proteger os principais componentes da estrutura dos efeitos nocivos causado por terremotos, ventos fortes entre outros, esses dispositivos auxiliam os membros estruturais a participar em menor grau no processo de dissipação de energia, de forma que os danos que podem ocorrer devido a fortes excitações são sofridos pelos dissipadores, que são fáceis de identificar e substituir [Oviedo e Duque, 2006].

Este tipo de controle estrutural não precisa de uma fonte de energia externa para funcionar, também contém menos elementos estruturais e seus procedimentos de análise e projeto são relativamente simples [Christensen, 2001].

Este tipo de sistema possui uma ampla gama de materiais e dispositivos, que possuem diversos princípios de operação, tais como, deformação inelástica de metais, fricção deslizante entre corpos sólidos em contato, orifício de fluido, deformação por cisalhamento entre outros [Soong e Spencer, 2002], A principal característica deste tipo de dispositivo é que eles fornecem

rigidez e amortecimento à estrutura e, portanto, influenciam a resposta dinâmica da estrutura [Whittaker et al., 1991].

Os sistemas de controle passivos são divididos em dois grupos de acordo com sua função na estrutura:

- Sistemas de isolamento sísmico;
- Sistemas de dissipação de energia.

Os sistemas de isolamento sísmico são geralmente introduzidos na base dos edifícios, o seu objetivo principal é dissipar uma parte da excitação produzida por um evento sísmico antes de ser transmitida à estrutura [Oviedo e Duque, 2006]. Dispositivos de isolamento sísmico são adequados para edifícios de altura curta a média, com modos de vibração dominantes dentro de um intervalo especificado [Saaed et al., 2013], esses dispositivos não são eficientes para resistir a vibrações de ventos fortes [De la Cruz, 2003].

Os dispositivos de dissipação de energia têm a função de absorver parte da energia que é transmitida à edificação e contribuir para a redução da demanda de dissipação de energia desta, geralmente esses dispositivos são introduzidos na estrutura por meio de sistemas de braço [Saaed et al., 2013].

Os sistemas de dissipação de energia podem ser classificados em três grupos [Symas et al., 2008]:

- Dissipadores dependentes da velocidade

Nesse grupo estão os dissipadores cuja força de resposta depende principalmente da velocidade relativa nas extremidades do dispositivo, nesta classificação estão os dissipadores do tipo viscoso.

- Dissipadores dependentes do deslocamento

São dispositivos para os quais a força de saída não depende da taxa de variação do deslocamento ao longo do dispositivo, mas sim da magnitude do referido deslocamento, neste grupo encontram-se os dissipadores histeréticos onde se encontram os de tipo metálico e os de fricção.

- Outros

Este grupo inclui dissipadores de massa sincronizados.

2.2.1 Dissipadores de Fricção

Este tipo de dissipador dissipa energia através do atrito deslizante na interface de dois corpos sólidos, entre os dispositivos mais utilizados estão os de reforço cruzado, este tipo de dissipador é acoplada por parafusos ao sistema de armadura transversal e sob cargas laterais é acoplado para que dois de seus componentes experimentam tração e os dois restantes experimentam compressão, o que gera uma deformação devido ao deslocamento relativo, liberando energia nas juntas por meio do atrito deslizante [Symas et al., 2008].

Entre suas principais qualidades está a capacidade de dissipar grandes quantidades de energia por ciclo [Marko, 2006].

2.2.2 Dissipadores de Fluido Viscoso

Embora inicialmente não tenha sido aplicado na área de controle de vibrações em estruturas, esses dissipadores tornaram-se uma boa opção para este tipo de aplicações, este dispositivo é composto por um cilindro que possui um pistão, o cilindro contém um fluido levemente viscoso enquanto o pistão que atua no cilindro possui uma série de orifícios por onde a substância flui. Ao entrar em operação, a passagem do fluido pelos orifícios do pistão gera calor e com isso ocorre a dissipação de energia [Oviedo e duque, 2006].

Entre suas principais vantagens destaca-se o início de operação em baixas amplitudes e entre seus inconvenientes está a possibilidade de apresentar perda de fluido através das gaxetas [Symas et al., 2008].

2.2.3 Dissipadores Viscoelásticos

Este tipo de dissipadores consiste em um material copolímeros e substâncias vítreas mantido entre duas placas metálicas que são conectadas à estrutura por meio de um braço, quando ocorrer uma excitação na estrutura, o movimento das placas aquecerá o material contido entre elas causando a dissipação de energia.

Para baixas frequências, os dissipadores viscoelásticos apresentam baixa rigidez e baixa capacidade de dissipação, porém, conforme os valores de frequência aumentam, esses parâmetros incrementam [Symas et al., 2008].

2.2.4 Dissipadores de Massa Sincronizados

Amortecedores de massa sincronizados são corpos que são colocados na estrutura para absorver as vibrações produzidas pela excitação dinâmica. Sua frequência é sincronizada com a frequência fundamental da estrutura, desta forma ao receber uma excitação ressonante, o dispositivo receberá a maior parte da excitação e a estrutura será protegida.

2.3 Operação de Sistemas de Controle Passivos

Para entender o efeito dos sistemas de controle passivo de vibração dentro de uma estrutura, considere o edifício como um sistema de um grau de liberdade que tem uma rigidez k , um coeficiente de amortecimento c , tem uma massa m e está sendo excitado por uma aceleração sísmica \ddot{x}_g devido a isto, a estrutura tem uma resposta lateral x , levando isso em consideração, a equação de movimento para o modelo proposto tem a seguinte forma

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g \quad (2.1)$$

Representando esta expressão em termos de energia proposta por Uang e Bertero, 1990, para mostrar o comportamento de uma estrutura sob excitações dinâmicas, se obtém

$$E_K + E_D + E_S = E_I \quad (2.2)$$

onde E_K , E_D , E_S , E_I representam, respectivamente, a energia cinética da massa, a energia dissipada pelo amortecimento da estrutura, a energia devida à deformação elástica do sistema e a energia induzida ao sistema devido ao movimento sísmico.

Como já havia sido mencionado, no caso do sistema de isolamento de bases, sua presença na estrutura proporciona uma diminuição no valor da energia induzida ao sistema, E_I , no caso de sistemas de dissipação de energia usando dissipadores metálicos, uma nova variável é adicionada à Equação 2.2, E_H , o que resulta em

$$E_K + E_D + E_S + E_H = E_I \quad (2.3)$$

a variável E_H representa a energia dissipada no momento em que a estrutura se encontra em regime inelástico durante o período de excitação, este valor considera tanto a dissipação gerada pela estrutura como a gerada pelo dispositivo adicionado.

No caso de dispositivos de dissipação de energia que são instalados diretamente nos membros principais da estrutura, uma forma de entender sua importância dentro da edificação é analisando o conceito de medida de dano, DM. A medida de dano representa o dano experimentado por um membro estrutural sob o efeito de uma excitação, este valor é calculado pela expressão [Symas et al., 2008]

$$DM = \frac{\mu_{Demand}}{\mu_{Capacity}} + 4\rho \frac{E_{Demand}}{E_{Capacity}} \quad (2.4)$$

onde os termos μ_{Demand} e E_{Demand} representam, respectivamente, a demanda máxima de ductilidade e a demanda de dissipação de energia de histerese acumulada, de forma semelhante, $\mu_{Capacity}$ e $E_{Capacity}$ correspondem à capacidade de ductilidade e a capacidade de dissipação

de energia histerética do componente estrutural, por outro lado, ρ é um fator de calibração que depende do material e é selecionado para obter medidas de danos na faixa entre 0 e 1, levando em consideração que 1 representa dano severo e que a medida de dano DM não pode exceder o valor de 0,4. É importante esclarecer que a medida de dano se aplica aos componentes principais da estrutura e não à estrutura completa.

Nesta parte do documento pretende-se mostrar de forma simples como por meio da medida de dano é possível observar a influência de dispositivos de dissipação de energia passiva que influenciam na resposta dinâmica de um elemento estrutural, o aprofundamento da medida de dano não é abordado neste texto, a descrição completa deste conceito é analisada na norma técnica FEMA 273.

No sistema estrutural, a capacidade de dissipação de energia é igual à energia histerética acumulada dissipada pelas juntas esféricas plásticas da viga, na Figura 2.1 é mostrada uma representação da instalação de um dissipador em um pórtico estrutural.

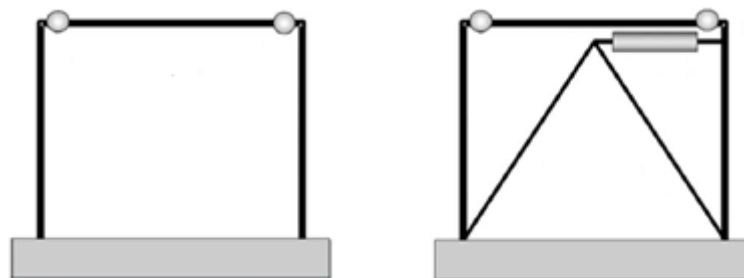


Figura 2.1 – Representação da instalação de um dissipador num pórtico [Adaptado de Symas et al., 2008]

Observando a Equação 2.4 pode-se concluir que para reduzir o valor da medida de dano existem duas opções, a primeira é reduzir a demanda por ductilidade e a demanda de dissipação de energia ou aumentar a capacidade dessas duas propriedades na estrutura, não obstante, a segunda opção não é uma alternativa economicamente viável, portanto, para reduzir o valor da medida de dano, é necessário diminuir tanto a demanda de ductilidade quanto a demanda de

dissipação de energia histerética, o que pode ser alcançado introduzindo um dispositivo de dissipação de energia passiva [Symas et al., 2008].

Quando são utilizados dispositivos de fluido viscoelástico, a redução na demanda de ductilidade ocorre ao reduzir os deslocamentos devido ao aumento do amortecimento da estrutura; o uso desses dispositivos contribui para aumentar o valor de E_D da Equação 2.1 enquanto para no caso de dissipadores metálicos, contribuem para este objetivo, da mesma forma, ao reduzir os deslocamentos, mas desta vez em função do aumento da rigidez da estrutura, o uso de dissipadores metálicos, como já foi apresentado, gera um aumento no valor de E_H . Assim que os dispositivos entrarem em operação, eles contribuem para a diminuição da demanda de dissipação de energia.

2.4 Dissipadores Metálicos

Este tipo de dispositivo dissipa energia através do processo de deformação inelástica em metais, estes dissipadores são considerados uma boa alternativa tanto para proteção quanto para reforço de estruturas por apresentarem baixos custos de produção, comportamento histerético estável, resistência a fatores ambientais, independência da taxa de variação do deslocamento, entre outros, embora sua principal característica seja que adiciona amortecimento e rigidez à estrutura. Entre suas desvantagens está que após cumprir sua função na estrutura, esse tipo de dispositivo precisa ser substituído [Constantinou et al., 1997].

2.4.1 Comportamento de Dissipadores de Metálicos

Entre as principais qualidades dos dissipadores do tipo metálico está seu comportamento histerético estável. O comportamento da histerese de um dissipador metálico é de vital importância, pois através deste comportamento é possível observar a capacidade de dissipação do dispositivo.

Ao contrário dos dissipadores de fricção, que também pertencem ao grupo dos dissipadores histeréticos, os dissipadores metálicos apresentam um comportamento de histerese não linear, isto devido ao fato de seu funcionamento se basear na deformação inelástica do

metal. A Figura 2.2 mostra uma representação do comportamento de um dissipador de metal antes e no momento da excitação.

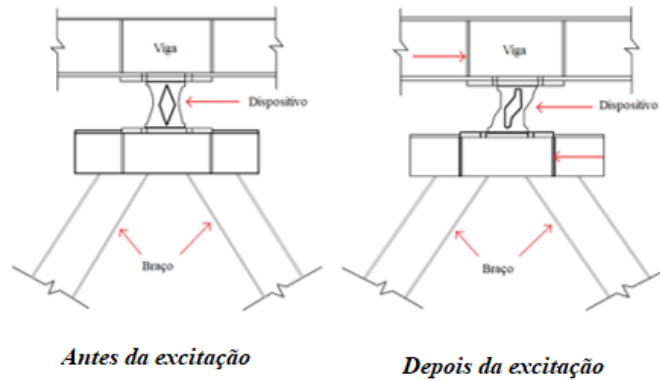


Figura 2.2 - Comportamento de um dissipador metálico em uma estrutura [Adaptado de Tenura et al.,2015]

Quando um metal é submetido a uma carga monotônica, o material entra na fase de plastificação quando a tensão aplicada ultrapassa o limite elástico, se após mais esta tensão for aplicada o material sofrerá um endurecimento por tensão, por outro lado, quando é submetido a uma carga cíclica, o módulo de elasticidade do material se recupera à medida que é descarregado, mas se uma carga for aplicada na direção oposta, o material entrará na zona plástica com um valor de tensão inferior ou limite elástico, esse fenômeno é conhecido como efeito Bauschinger. Se a carga aplicada continuar, esse comportamento continuará até atingir a deformação máxima. Esse comportamento é semelhante em quase todos os metais, exceto, para aqueles com propriedade de memória de forma [Bannantine et al., 1999].

A Figura 2.3 apresenta a comparação do comportamento histerético idealizado da maioria dos metais e metais com memória de forma.

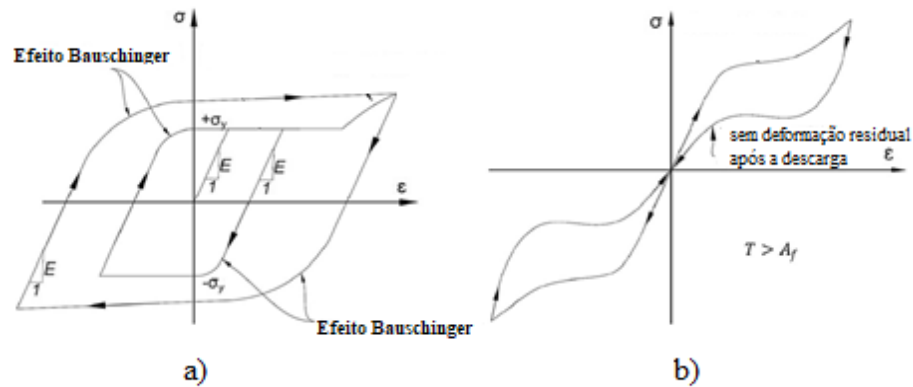


Figura 2.3 - Comparação do comportamento de metais sob carga cíclica. a) metais convencionais b) metais de liga com memória de forma [adaptado de Javanmardi et al., 2019].

2.4.2 Classificação de Dissipadores Metálicos

Os dissipadores metálicos são classificados de acordo com o material de que são compostos, assim tem-se:

- Dissipadores de aço;
- Dissipadores de alumínio;
- Dissipadores de chumbo;
- Dissipadores de cobre;
- Dissipadores de liga com memória de forma.

2.4.3 Dissipadores de Aço

O principal tipo de aço utilizado para esses dispositivos é o aço carbono ou aço de baixo ponto de escoamento, este tipo de dissipador possui uma grande variedade de dispositivos, seu primeiro surgimento remonta a 1972 onde Kelly et al., apresentaram 3 alternativas para a absorção de energia sísmica em estruturas, os modelos utilizados na ocasião foram dissipadores

em forma de U, dissipadores torcionais e dissipadores flexíveis, estes dissipadores são apresentados na Figura 2.4.

Após o surgimento desses dispositivos, diversos tipos de dissipadores foram gerados com características diferentes, variando do formato ao modo de operação, entre os mais comuns estão o tipo ADAS, dissipadores de braço com flambagem restrita (BRB), dissipador de placa ranhurada, entre outros [Javanmardi et al., 2019].

Os dissipadores de tipo ADAS são chapas de aço em forma de x, que são conectadas paralelamente à placa base por meio de parafusos, a principal característica deste dispositivo é que adicionam amortecimento e rigidez à estrutura, daí seu nome ADAS (*Added Damping And Stiffness*), uma variação desse tipo de dispositivo é o TADAS e sua principal diferença é que os TADAS são placas de aço de formato triangular [Javanmardi et al., 2019].

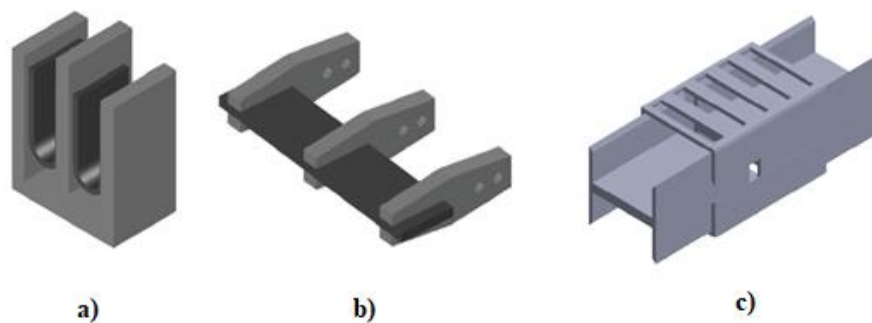


Figura 2.4 - Primeiros modelos de dissipadores metálicos propostos por Kelly et al., 1972. a) dissipadores em forma de U b) dissipadores torcionais c) dissipadores flexíveis [Adaptado de Javanmardi et al., 2019].

Os dissipadores tipo BRB são constituídos por 4 chapas de aço que são soldadas e inseridas em uma seção tubular quadrada, dita seção é preenchida com um material especial que evita a deformação das chapas no interior do tubo, este tipo de dispositivo operam sob

cargas de tensão e compressão [Soong e Spencer, 2002]. Os dissipadores do tipo BRB não requerem braço de reforço para instalação, pois como o próprio nome indica, este dispositivo é um braço acoplado ao edifício.

Os dissipadores de placa ranhurada são instalados na estrutura por meio de parafusos, sua instalação é feita através do sistema de braço chevron, as ranhuras neste dispositivo devem ser arredondadas para evitar concentração de tensões.

Outro tipo de dissipador de aço, no qual é objeto deste estudo, é conhecido como VPD (*vertical Pipe Damper*), este dissipador é basicamente uma seção tubular cilíndrica que é conectada verticalmente à estrutura, sua principal característica é a capacidade do dispositivo de suportar cargas em duas direções.

Como dispositivos do tipo ADAS, os VPDs são instalados na estrutura usando reforços do tipo chevron. A Figura 2.6 apresenta uma vista frontal dos dissipadores tipo ADAS, TADAS e VPD.

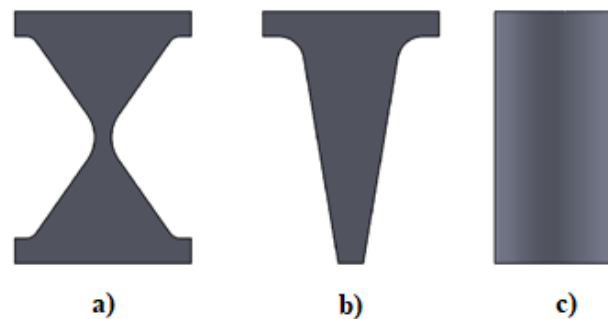


Figura 2.5 – Dissipadores metálicos a) ADAS b) TADAS c) VPD.

2.4.4 Dissipadores de Alumínio

Oferecem maior ductilidade e menor deslocamento de fluência em relação ao aço, algumas configurações com as mesmas características apresentam melhor desempenho [Javanmardi et al., 2019].

2.4.5 Dissipadores de Chumbo

Esses amortecedores funcionam por extrusão de chumbo e devido à sua capacidade de recristalização, não precisam ser substituídos após o terremoto, porém seu valor é superior e são mais pesados que os de aço [Javanmardi et al., 2019; Curadelli, 2003].

Possui boa aceitação devido às suas características favoráveis como

- Recristalização rápida em temperatura ambiente;
- Alta durabilidade em ciclos de alta fadiga.

2.4.6 Dissipadores de Cobre

Possuem alta durabilidade, baixa fluência e resistência à corrosão. Este tipo de amortecedor é eficaz durante movimentos de terra de baixa impulsividade e menos eficiente ao entrar na faixa inelástica. Eles são muito pouco atraentes, pois seu valor é mais alto [Javanmardi et al., 2019].

2.4.7 Dissipadores de Liga com Memória de Forma

Esses dispositivos são capazes de suportar grandes deformações sem mostrar sinais de deformações residuais logo de ser descarregados, são utilizados principalmente na proteção sísmica de pontes e embora apresentem bom desempenho, o alto custo desses materiais torna esses dispositivos uma opção pouco atraente [Javanmandi et al., 2019]. As vantagens deste tipo de material são muitas: possui mecanismo de autocentragem, é insensível ao meio ambiente, tem excelente resistência à fadiga, é resistência à corrosão e, finalmente, é capaz de produzir grandes forças de controle, mesmo para tempos de resposta lentos [Saaed et al., 2013].

2.4.8 Determinação do Comportamento de Histerese em Dissipadores Metálicos

Como mencionado anteriormente, uma das propriedades mais importantes dos dissipadores metálicos é o seu comportamento de histerese estável, o ciclo de histerese relaciona os deslocamentos que estão sendo induzidos no dispositivo e a força de resposta devido à

referida excitação. A área sob esta curva representa a quantidade de energia que está sendo dissipada pelo dispositivo.

A expressão que representa a energia que está sendo liberada pelo dissipador pode ser escrita como

$$E_p = \oint F * du . \quad (2.5)$$

Os testes para determinar o comportamento de histerese de dissipadores metálicos estão contemplados na norma técnica FEMA 461, onde os protocolos são estabelecidos para determinar as características de desempenho sísmico de componentes estruturais e não estruturais.

A norma possui dois protocolos, porém, apenas um deles é utilizado para determinar o comportamento de histerese desses dispositivos, esse protocolo é denominado protocolo quase estático.

Este teste deve ser aplicado se deseja determinar as características de desempenho dos componentes cuja resposta é controlada principalmente pela aplicação de forças sísmicas ou deslocamentos, mas se esses componentes também são necessários para determinar o comportamento de resposta da estrutura.

Existem dois testes neste protocolo:

- Teste de *racking*: aplicado a elementos que não proporcionam rigidez ou amortecimento;
- Teste de histerese: aplicado aos componentes que proporcionam rigidez e / ou amortecimento à estrutura.

O teste de histerese deve ser realizado sob condições de carga controlada na forma de força ou deslocamento. O protocolo de carregamento consiste em ciclos repetidos de amplitudes

de deformação que vão sendo aumentadas gradativamente, cada ciclo compreenderá duas repetições de amplitude, pelo menos este teste deve compreender 10 ciclos.

Para a aplicação da carga, a norma recomenda iniciar com um valor de amplitude de 0,0015 ou definir uma amplitude máxima de deformação, para qualquer um dos casos deve-se levar em consideração que o aumento de amplitude em cada ciclo é dado pela expressão

$$a_{i+1} = 1,4a_i \quad (2.6)$$

No caso de seleção de uma amplitude máxima, se o dispositivo não apresentar sinais de falha, o aumento de amplitude após este valor deve ser $0,3 a_m$, com a_m como a amplitude máxima de deformação selecionada.

Este procedimento é utilizado para determinar o comportamento de histerese de um dispositivo com características geométricas estabelecidas e não faz parte de um método para o projeto de dissipadores metálicos, para tanto é utilizada a norma técnica ASCE 7 -16 em que se conhece a resposta dinâmica da estrutura sem dissipadores, é iniciado um processo iterativo de dimensionamento e localização dos dissipadores de energia até que seja obtida a configuração que apresentar os melhores resultados.

2.5 Otimização

A otimização pode ser definida como o processo de procura das condições que proporcionem os melhores resultados possíveis, no cotidiano, a otimização pode ser representada pela seleção do caminho que lhe permite chegar à casa mais rapidamente ou determinar em que ponto de uma prova deve-se iniciar para aproveitar melhor o tempo disponível, em termos gerais, a otimização consiste em tomar decisões que permitam minimizar esforços ou maximizar benefícios em um conjunto de circunstâncias estabelecidas [Xin,2010].

No campo da matemática, um problema de otimização consiste em encontrar os valores que permitem a maximização ou minimização de uma função objetivo sujeita a um conjunto de restrições estabelecidas.

2.5.1 Formulação de um Problema de Otimização

Um problema de otimização pode ser expresso como

$$\text{Encontrar } \mathbf{X} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} \text{ que maximiza a função } f(\mathbf{X})$$

sujeito a restrições

$$\begin{aligned} g_j(\mathbf{X}) &\leq 0, & j = 1, 2, 3, \dots, m \\ l_j(\mathbf{X}) &= 0, & j = 1, 2, 3, \dots, p \end{aligned} \tag{2.7}$$

onde \mathbf{X} é um vetor n-direcional denominado vetor de projeto, $f(\mathbf{X})$ é a função objetivo e $g_j(\mathbf{X})$ e $l_j(\mathbf{X})$ são restrições de desigualdade e igualdade, respectivamente.

2.5.1.1 Vetor de Projeto

Este é um vetor que contém todas as variáveis que definem o sistema, dentro deste vetor existem algumas variáveis que permanecem fixas no processo de otimização, essas variáveis são conhecidas como parâmetros pré-atribuídos ou simplesmente parâmetros, por outro lado, aquelas variáveis que mudam durante o processo de otimização são chamadas de variáveis de projeto ou variáveis independentes. Como variáveis independentes são normalmente selecionadas as variáveis que mais influenciam a função objetivo.

2.5.1.2 Função Objetivo

Este é o critério utilizado para avaliar cada uma das alternativas geradas no processo de otimização, permite determinar os melhores valores das variáveis de projeto, a seleção da função objetivo é uma das etapas mais importantes em um problema de otimização e embora em muitos casos de problemas de otimização esta seleção possa ser simples, pode haver casos em que a otimização para um determinado critério pode levar a resultados que não podem ser aceitáveis em relação a outro critério, nos casos em que há mais de um critério para a avaliação de variáveis de projeto são conhecidas como problemas de otimização multiobjetivo.

A maneira de resolver os conflitos entre os diferentes critérios é criando uma função objetivo global como uma combinação linear das múltiplas funções objetivo do problema de otimização, portanto, a função objetivo global pode ser expressa como

$$f(\mathbf{X}) = \alpha_1 f_1(\mathbf{X}) + \alpha_2 f_2(\mathbf{X}) \quad (2.8)$$

onde f_1 e f_2 são as funções objetivo do problema de otimização e α_1 e α_2 são constantes que indicam a importância relativa entre as funções [Rao,2009].

2.5.1.3 Restrições

Em muitos dos problemas de otimização, as variáveis de projeto não podem assumir valores arbitrários devido às limitações geométricas ou operacionais entre outras, de acordo com isso, algumas restrições devem ser satisfeitas para garantir que o processo de otimização gere alternativas aceitáveis.

As restrições que representam uma limitação no comportamento, desempenho ou funcionalidade do sistema são chamadas de restrições de funcionalidade ou comportamento, aquelas que representam limitações físicas do sistema são conhecidas como restrições geométricas, além disso, as restrições podem ser de igualdade ou de desigualdade. As restrições delimitam o espaço onde as variáveis de projeto podem assumir valores aceitáveis.

2.5.2 Classificação de Problemas de Otimização

Problemas de otimização podem ser classificados de várias maneiras de acordo com as características dos elementos que fazem parte de sua formulação, a classificação dos problemas de otimização não está bem estabelecida e na literatura ainda existe alguma confusão, principalmente no uso de algumas terminologias [Xin,2010].

Nesta seção, algumas das principais classificações de problemas de otimização são citadas.

2.5.2.1 Classificação com Base na Existência de Restrições

Esta classificação leva em consideração se o problema de otimização tem ou não restrições, caso haja restrições na formulação do problema, este tipo de problema de otimização é conhecido como problema de *otimização restrito*, e na falta disso é denominado problema de *otimização irrestrito*.

2.5.2.2 Classificação com Base na Natureza das Variáveis de Projeto

Essa classificação leva em consideração se as variáveis de projeto minimizam ou maximizam a função objetivo que lhes é prescrita e estão sujeitas a certas restrições ou se essas variáveis são funções contínuas de outro parâmetro que minimiza ou maximiza a função objetivo.

Desta forma, você tem problemas de otimização *estáticos* e problemas de otimização *dinâmicos*. Para melhor estes conceitos podemos considerar o projeto de uma viga submetida a uma carga concentrada e sujeita a um determinado valor de deflexão como se apresenta na Figura 2.7, a viga deve ser otimizada para se obter o menor peso possível, no caso do problema de otimização estático a viga pode ter seção retangular constante e o problema de otimização pode ser expresso como

$$\text{Encontrar } \mathbf{X} = \begin{Bmatrix} b \\ t \end{Bmatrix} \text{ que maximiza a função } f(\mathbf{X}) = \rho b d l$$

submetido às restrições

$$\delta(\mathbf{X}) \leq \delta_{Max}$$

$$b \geq 0$$

$$d(t) \geq 0$$
(2.9)

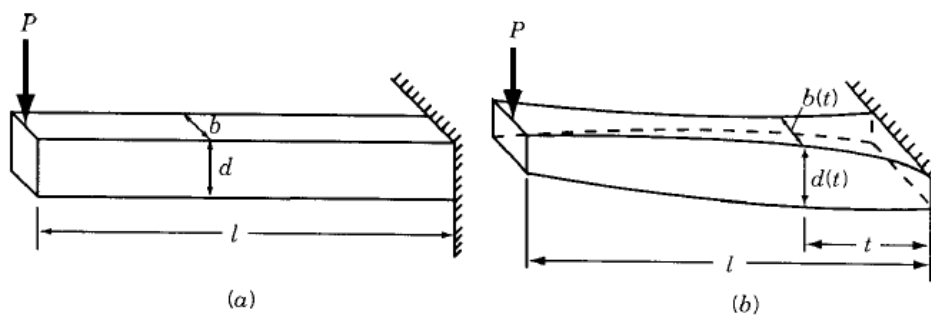


Figura 2.6 - Viga sob a carga concentrada [Adaptada de Rao, 2010]

2.5.2.3 Classificação com Base na Natureza das Equações Envolvidas

Esta classificação é baseada na natureza das restrições e da função objetivo, de acordo com esta classificação, um problema de otimização pode ser linear, não linear, geométrico ou quadrático.

O problema de *otimização linear* é aquele em que as restrições e a função objetivo são funções lineares das variáveis de projeto.

Um problema de *otimização não linear* é um problema de otimização onde algumas das funções, tanto as restrições quanto a função objetivo, são não lineares.

Um problema de *otimização geométrico* surge quando as funções correspondentes às restrições e aos critérios de seleção podem ser expressas como polinômios. Uma função $h(\mathbf{X})$ com N termos pode ser chamada de polinomial se tiver a seguinte forma

$$h(\mathbf{X}) = c_1 x_1^{a11} x_2^{a12} \dots x_n^{a1n} + \dots + c_N x_1^{aN1} x_2^{aN2} \dots x_n^{aNn} \quad (2.10)$$

Por último, os Problemas de *otimização quadrático* são problemas de otimização cujas restrições são funções lineares, mas sua função objetivo é uma função quadrática.

2.5.2.4 Classificação Baseada nos Valores Permitidos das Variáveis de Projeto

Se as variáveis de projeto usadas em um processo de otimização podem assumir qualquer valor real, este problema de otimização é conhecido como um valor real ou problema de otimização de variável *contínua*, caso contrário, se os valores das variáveis de projeto são restritos a assumir valores inteiros é apresentando um problema de otimização de variável *discreta*.

2.5.2.5 Classificação com Base na Natureza Determinística das Variáveis

Com base nesta classificação, os problemas de otimização podem ser classificados como *determinísticos* ou *estocásticos*, a diferença entre essas duas definições é que nos problemas de otimização *estocásticos* alguns ou todos os parâmetros são probabilísticos.

2.5.2.6 Classificação com Base no Número de Funções Objetivo

Para finalizar com as classificações dos problemas de otimização apresentadas neste documento, os problemas de otimização podem ser classificados de acordo com o número de funções objetivo existentes, desta forma, um problema de otimização pode ser *simples*, se tiver apenas uma função objetivo ou *multiobjetivo* no caso contrário, conforme apresentado em seções anteriores, uma função objetivo de um problema de otimização multiobjetivo é representada pela Equação 2.8.

Finalmente, a classificação dos diferentes problemas de otimização é apresentada na Figura 2.8.

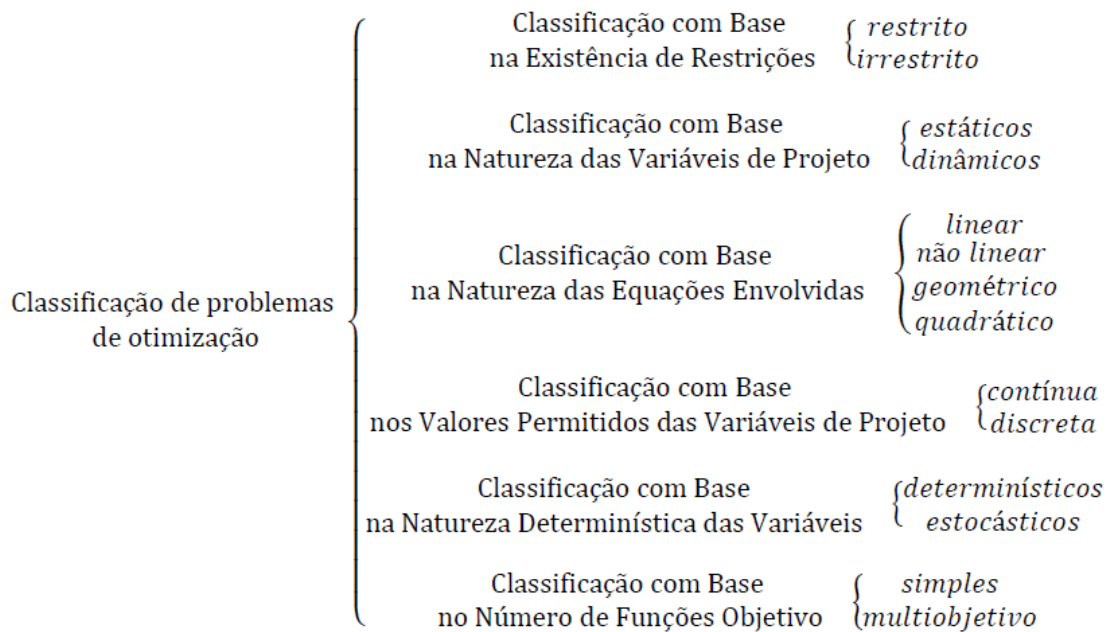


Figura 2.7 - Classificação de Problemas de Otimização [Adaptado de Xin,2010]

2.5.3 Otimização Aplicada ao Projeto Estrutural

No campo do projeto estrutural, os problemas de otimização podem ser categorizados de acordo com três variáveis de projeto, parâmetros, forma e topologia [Zhang e Zhu,2018].

Para explicar cada um desses tipos de problemas considere a placa com furo de raio r conforme apresentado na Figura 2.9, a otimização do parâmetros pode realizar a variação do tamanho do furo procurando reduzir o peso da placa, conforme a problema de otimização de forma, pode-se propor a opção de modificar o tamanho e a forma do furo, passando de um furo circular para outro em forma de parábola, finalmente um processo de otimização topológica para o sistema proposto consistiria em distribuir o material disponível de uma forma melhor [Zhang e Zhu,2018].

Em um problema de parâmetros o domínio do modelo de projeto e o estado das variáveis são conhecidos a priori e são fixos ao longo do processo de otimização, no caso de otimização

de forma, o domínio passa a ser a variável de projeto, por outro lado, a otimização topológica envolve a determinação de características como número, localização e tamanho dos furos e conectividade do domínio [Bendsøe e Sigmund,2004].

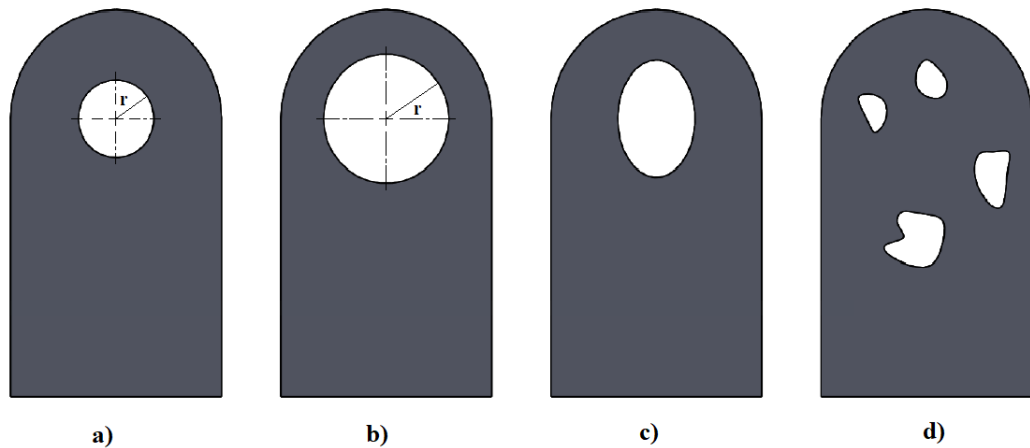


Figura 2.8 – a) Original b) Otimização de parâmetros c) Otimização de forma d) Otimização topológica para uma placa

Embora a otimização da forma seja uma subclasse da otimização topológica, geralmente são tratadas separadamente. Voltando ao exemplo da placa, a principal diferença entre a otimização da forma e a otimização topológica é que pela otimização da forma é possível alterar a forma do furo, mantendo constante as propriedades do sistema, a otimização topológica pode modificar as propriedades da placa adicionando material ou removendo uma quantidade maior do que o orifício existente [Zhang e Zhu,2018].

Aplicando esses conceitos a uma estrutura, tendo a treliça apresentada na Figura 2.10a, uma aplicação de otimização de parâmetros pode ser a variação da seção transversal dos membros estruturais conforme mostrado na Figura 2.10b, por outro lado, a otimização da forma pode ser realizada variando o ângulo da treliça ou modificando suas relações geométricas (Figura 2.10c), finalmente, a otimização topológica está relacionada com a configuração dos membros estruturais, a estrutura e a conectividade entre cada um deles conforme mostrado na Figura 2.10d [Rothwell, 2017].

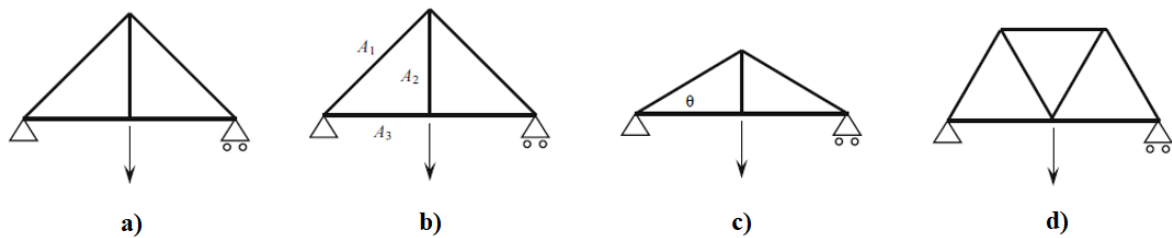


Figura 2.9 - a) Original b) Otimização de parâmetros c) Otimização de forma d) Otimização topológica para treliça

2.6 Metaheurísticas

Metaheurísticas representam uma família de técnicas de otimização que cresceram em popularidade nas últimas duas décadas. Elas estão entre as técnicas mais promissoras e bem-sucedidas. Metaheurísticas fornecem soluções "aceitáveis" em um tempo razoável para resolver problemas difíceis e complexos em ciência e engenharia [Talbi, 2009].

Uma metaheurística é em geral um método de exploração, frequentemente estocástico. A utilização dessas técnicas de otimização ocorre quando, devido à natureza da função objetivo, não é possível conhecer seus gradientes com antecedência.

Entre as principais características das metaheurísticas estão [Chopard e Tomassini, 2018]:

- Eles não fazem hipóteses sobre as propriedades matemáticas da função objetivo, como continuidade ou diferenciabilidade, a única coisa que é necessária é que a função objetivo possa ser calculada para todas as variáveis que pertencem ao domínio.
- Eles usam parâmetros para orientar a exploração, esses parâmetros influenciam na qualidade da solução encontrada e na velocidade para alcançar a convergência.
- É necessário especificar um ponto de partida para iniciar o processo, mas a solução inicial nem sempre é gerada de forma aleatória.
- Uma condição de parada deve ser incluída.

- Geralmente são fáceis de aplicar.

Em todos os casos, uma metaheurística percorre o espaço o domínio tentando combinar duas ações: intensificação e diversificação, também chamadas de exploração e exploração respectivamente. Em uma fase de intensificação, a exploração ocorre na vizinhança de uma solução já promissora no domínio. Durante a diversificação, uma metaheurística tenta visitar regiões do espaço de busca que ainda não foram vistas [Chopard e Tomassini, 2018].

Os dois componentes principais de qualquer algoritmo metaheurístico são: a seleção das melhores soluções e à randomização. Selecionar o melhor garante que as soluções convergem para a otimização, enquanto a randomização evita que as soluções fiquem presas no ótimo local e, ao mesmo tempo, aumenta a diversidade de soluções. A boa combinação desses dois componentes geralmente garantirá que a otimização global possa ser alcançada [Xin, 2010].

2.6.1 Classificação de Algoritmos Metaheurísticos

Os algoritmos metaheurísticos podem ser classificados de maneiras diferentes, mas podem ser agrupados em duas categorias, dependendo principalmente de suas características.

2.6.1.1 Determinístico e Estocástico

Um algoritmo metaheurístico determinístico resolve problemas de otimização tomando decisões determinísticas [Talbi, 2009], eles seguem um procedimento rigoroso e seu caminho e os valores das variáveis e funções de projeto são repetíveis enquanto aqueles do tipo estocástico usam regras de aleatoriedade durante o processo [Xin, 2010].

Expresso de outra forma, usando as mesmas condições iniciais, um algoritmo determinístico sempre chegará à mesma resposta, não importa quantas vezes o procedimento seja executado, ao contrário dos estocásticos onde diferentes resultados finais são obtidos a partir das mesmas condições iniciais [Talbi, 2009].

2.6.1.2 Busca com Base na População ou Busca com Base na Trajetória

As metaheurísticas com base na trajetória manipulam e transformam uma única solução durante o processo de otimização, ou seja, a partir de uma solução selecionada, a busca por uma nova solução é realizada na vizinhança ou no espaço próximo da solução atual, por outro lado, algoritmos metaheurísticos de base populacional evoluem um conjunto de soluções que permitem uma melhor diversificação do espaço de busca [Talbi, 2009; Xin, 2010; Chopard e Tomassini, 2018].

2.6.2 Metaheurísticas Modernas

Esta seção apresentará brevemente algumas das técnicas metaheurísticas mais populares na solução de problemas complexos de engenharia [Rao, 2009].

2.6.2.1 Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithm*)

O Algoritmo Genético (GA), desenvolvido por John Holland e seus colaboradores nas décadas de 1960 e 1970, é um modelo ou abstração da evolução biológica com base na teoria da seleção natural de Charles Darwin. Holland foi o primeiro a usar cruzamento e recombinação, mutação e seleção no estudo de sistemas adaptativos e artificiais. Esses operadores genéticos são uma parte essencial do algoritmo genético como estratégia de solução de problemas. Desde então, muitas variantes de algoritmos genéticos foram desenvolvidas e aplicadas a uma ampla gama de problemas de otimização, desde a coloração de gráficos até o reconhecimento de padrões, de sistemas discretos, como o problema do caixeiro viajante, a sistemas contínuos, como design eficiente, perfil aerodinâmico em engenharia aeroespacial. e do mercado financeiro à otimização da engenharia multiobjetivo.

Existem muitas vantagens dos algoritmos genéticos sobre os algoritmos de otimização tradicionais, e as duas vantagens mais notáveis são: a capacidade de lidar com problemas de otimização complexos e paralelismo.

Algoritmos genéticos podem lidar com vários tipos de otimização, seja a função objetivo (aptidão) estacionária ou não estacionária (mudança com o tempo), linear ou não linear,

contínua ou descontínua ou com ruído aleatório. Visto que múltiplos descendentes em uma população agem como agentes independentes, a população (ou qualquer subgrupo) pode explorar o espaço de busca em várias direções simultaneamente. Esse recurso o torna ideal para algoritmos de paralelização para implementação. Parâmetros diferentes e até grupos diferentes de cadeias codificadas podem ser manipulados ao mesmo tempo.

No entanto, os algoritmos genéticos também apresentam algumas desvantagens. A formulação da função de aptidão, o uso do tamanho da população, a escolha de parâmetros importantes, como a taxa de mutação e cruzamento, e os critérios de seleção da nova população, devem ser realizados com cuidado. Qualquer escolha inadequada tornará difícil para o algoritmo convergir ou simplesmente produzir resultados sem sentido. Apesar dessas desvantagens, os algoritmos genéticos continuam sendo um dos algoritmos de otimização mais amplamente usados na otimização não linear moderna.

A essência dos algoritmos genéticos envolve a codificação de uma função de otimização como *arrays* de bits ou cadeias de caracteres para representar cromossomos, operações de manipulação de cadeias por operadores genéticos e seleção de acordo com sua adequação para o propósito de encontrar uma solução para o problema. preocupado. Isso geralmente é feito usando o seguinte procedimento:

- Codificação de objetivos ou funções de otimização;
- Definição de função de aptidão ou critério de seleção;
- Inicializar uma população de indivíduos;
- Avaliar a aptidão de todos os indivíduos da população;
- Criar uma nova população realizando cruzamentos, mutações, adequação, reprodução proporcional, etc.
- Evolução da população até que certos critérios de interrupção sejam atendidos;
- Decodificar os resultados para obter a solução do problema.

Essas etapas podem ser representadas esquematicamente como o pseudocódigo dos algoritmos genéticos mostrados na Figura 2.11.

Modelo de Algoritmo Genético

Função objetiva $f(x)$, $x = (x_1, \dots, x_n)^T$
 Codifique para solução de dois cromossomos (cadeias binárias)
 Definir aptidão F (exemplo, $F \propto f(x)$ para maximização)
 Gerar uma população inicial
 iniciar probabilidades de cruzamento (p_c) y mutação (p_m)
 Mientras ($t < \text{Max número de gerações}$)
 Gerar uma nova solução por meio de crossover e mutação
 se $p_c > \text{rand}$, cruzamento; Terminar condição
 se $p_m > \text{rand}$, mutação ; Terminar condição
 Aceite a solução se o condicionamento físico aumentar
 Selecione a melhor solução atual para a nova geração
 Terminar condição
 Decodificar resultados e exibir

Figura 2.10 – modelo de algoritmo genético

Uma iteração de criação de uma nova população é chamada de geração. Sequências de comprimento fixo são usadas na maioria dos algoritmos genéticos durante cada geração, embora haja pesquisas substanciais sobre sequências de comprimento variável e estruturas de codificação. A codificação da função objetivo geralmente assume a forma de matrizes binárias ou matrizes de valores reais em algoritmos genéticos adaptativos.

Para simplificar, usamos cadeias binárias para codificação e decodificação. Os operadores genéticos incluem cruzamento, mutação e seleção da população.

O cruzamento de duas cadeias pai é o operador principal com uma probabilidade maior de p_c e é realizado trocando um segmento de um cromossomo com o segmento correspondente em outro cromossomo em uma posição aleatória (consulte a Figura 2.12). O cruzamento realizado desta forma é um crossover de um único ponto. O cruzamento em vários pontos também é usado em muitos algoritmos genéticos para aumentar a eficiência dos algoritmos.

A operação de mutação é realizada alterando os bits selecionados aleatoriamente (consulte a Figura 2.13) e a probabilidade de mutação p_m geralmente é pequeno. A seleção de um indivíduo em uma população é realizada avaliando sua aptidão, e pode permanecer na nova

geração se um determinado limiar de aptidão for atingido, também podemos usar que a reprodução de uma população é proporcional à aptidão. Ou seja, indivíduos com maior aptidão têm maior probabilidade de se reproduzir.

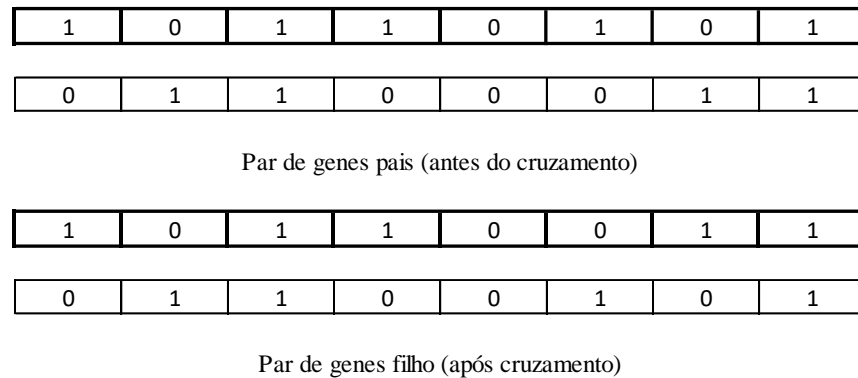


Figura 2.11 - Diagrama de cruzamento em um ponto de cruzamento aleatório (localização) em algoritmos genéticos.

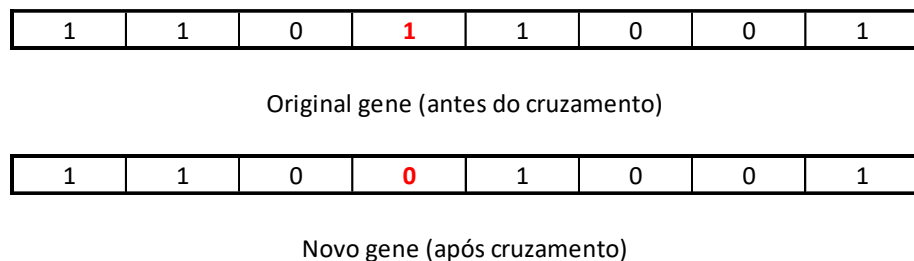


Figura 2.12 - Representação esquemática da mutação em um único local, invertendo um bit selecionado aleatoriamente (1 → 0).

Entre as vantagens dos algoritmos genéticos com os tradicionais estão a capacidade de resolver problemas complexos e seu paralelismo, por outro lado, entre suas principais desvantagens está a sensibilidade com os parâmetros, pois qualquer seleção inadequada faria com que o algoritmo não convergisse ou que apresentara resultados absurdos [Xin, 2010]. Este algoritmo metaheurístico está na categoria de pesquisa baseada na população.

2.6.2.2 Otimização de Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization*)

A otimização de enxame de partículas é outra metaheurística estocástica baseada em população inspirada na inteligência de enxame. Ele imita o comportamento social de organismos naturais, como bando de pássaros e cardumes de peixes, para encontrar um lugar com comida suficiente. De fato, nesses enxames, um comportamento coordenado usando movimentos locais emerge sem qualquer controle central. Originalmente, o PSO foi projetado com sucesso para problemas de otimização contínua. Sua primeira aplicação em problemas de otimização foi proposta por Kennedy e Eberhart (1995).

No modelo básico, um enxame consiste em N partículas voando em um espaço de busca D -dimensional. Cada partícula i é uma solução candidata ao problema e é representada pelo vetor x_i no espaço de decisão. Uma partícula tem sua própria posição e velocidade, o que significa a direção de vôo e passo da partícula.

A otimização aproveita a cooperação entre as partículas. O sucesso de algumas partículas influenciará o comportamento de seus pares. Cada partícula ajusta sucessivamente sua posição x_i em direção ao ótimo global de acordo com os dois fatores a seguir, a melhor posição visitada por si mesma (*pbest*) denotada como $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ e a melhor posição visitada por todo o enxame (*gbest*) (ou *lbest*, a melhor posição para um determinado subconjunto do enxame) denotado como $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$. O vetor $(p_g - x_i)$ representa a diferença entre a posição atual da partícula i e a melhor posição de sua vizinhança.

De acordo com a vizinhança usada, um líder (isto é, *lbest* ou *gbest*) representa a partícula que é usada para guiar a busca de uma partícula em direção a melhores regiões do espaço de decisão.

Uma partícula é composta por três vetores:

- O vetor x registra a posição atual (localização) da partícula no espaço de busca.
- O vetor p registra a localização da melhor solução encontrada até agora pela partícula.

- O vetor v contém um gradiente (direção) para o qual a partícula viajará se não for perturbada.
- Dois valores de aptidão: a aptidão x registra a aptidão do vetor x , e a aptidão p registra a aptidão do vetor p .

Atualizar a velocidade: A velocidade que define a quantidade de mudança que será aplicada à partícula é definida como

$$v_i(t) = v_i(t - 1) + \rho_1 C_1 \times (p_i - x_i(t - 1)) + \rho_2 C_2 \times (p_g - x_i(t - 1)) \quad (2.11)$$

Onde ρ_1 e ρ_2 são duas variáveis aleatórias no intervalo $[0, 1]$. As constantes C_1 e C_2 representam os fatores de aprendizagem. Eles representam a atração que uma partícula tem para seu próprio sucesso ou para o sucesso de seus vizinhos. O parâmetro C_1 é o fator de aprendizagem cognitiva que representa a atração que uma partícula exerce em relação ao seu próprio sucesso. O parâmetro C_2 é o fator de aprendizagem social que representa a atração que uma partícula tem para o sucesso de seus vizinhos. A velocidade define a direção e a distância que a partícula deve percorrer. Esta fórmula reflete um aspecto fundamental da sociabilidade humana, onde a tendência psicológica social dos indivíduos emula o sucesso de outros indivíduos. Seguindo a fórmula de atualização de velocidade, uma partícula fará um ciclo em torno do ponto definido como a média ponderada de p_i e p_g

$$\frac{\rho_1 p_i + \rho_2 p_g}{\rho_1 + \rho_2} \quad (2.12)$$

Os elementos de v_i são limitados a um valor máximo $[-V_{\max}, +V_{\max}]$, de forma que o sistema não explodirá devido à aleatoriedade do sistema. Se a velocidade v_i exceder V_{\max} (resp. $-V_{\max}$), ela será redefinida para V_{\max} (resp. $-V_{\max}$).

No procedimento de atualização de velocidade, um peso de inércia w é geralmente adicionado à velocidade anterior

$$v_i(t) = w \times v_i(t - 1) + \rho_1 \times (p_i - x_i(t - 1)) + \rho_2 \times (p_g - x_i(t - 1)) \quad (2.13)$$

O peso de inércia w controlará o impacto da velocidade anterior sobre a atual. Para grandes valores do peso de inércia, o impacto das velocidades anteriores será muito maior. Assim, o peso da inércia representa um trade-off entre a exploração global e a exploração local. Um grande peso de inércia incentiva a exploração global (ou seja, diversificar a pesquisa em todo o espaço de pesquisa), enquanto um peso de inércia menor incentiva a exploração local (ou seja, intensificar a pesquisa na região atual).

Atualizar a posição: Cada partícula atualizará suas coordenadas no espaço de decisão.

$$x_i(t) = x_i(t - 1) + v_i(t) \quad (2.14)$$

Em seguida, ele se move para a nova posição.

Atualize as melhores partículas encontradas: Cada partícula atualizará (potencialmente) a melhor solução local:

$$\text{sim } f(x_i) < p_{besti}, \text{ logo } p_i = x_i$$

Além disso, a melhor solução global do enxame é atualizada:

$$\text{sim } f(x_i) < g_{best}, \text{ logo } g_i = x_i$$

Portanto, a cada iteração, cada partícula mudará sua posição de acordo com sua própria experiência e a das partículas vizinhas.

Como em qualquer conceito de inteligência de enxame, os agentes (partículas para PSO) trocam informações para compartilhar experiências sobre as buscas realizadas. O comportamento de todo o sistema emerge da interação desses agentes simples. No PSO, a informação compartilhada é composta pela melhor solução global g_{best} .

A Figura 2.14 apresenta o modelo de código para o algoritmo de Enxame de Partículas

Modelo de algoritmo PSO

Iniciação aleatória de um enxame inteiro;

Repetir

Avalie $f(x_i)$;

para todas as partículas i

Atualização das Velocidades

$$v_i(t) = v_i(t - 1) + \rho_1 C_1 \times (p_i - x_i(t - 1)) + \rho_2 C_2 \times (p_g - x_i(t - 1));$$

Mover para a nova posição: $x_i(t) = x_i(t - 1) + v_i(t)$;

se $f(x_i) < f(pbest_i)$ **Logo** $pbest_i = x_i$;

se $f(x_i) < f(gbest_i)$ **Logo** $gbest_i = x_i$;

Atualizar (x_i, v_i) ;

Terminar condição

Até que o critério de parada seja alcançado

Figura 2.13 – Modelo de algoritmo PSO

2.6.2.3 Firefly Algorithm

As ideias principais vêm do comportamento biológico dos vaga-lumes, mas o algoritmo também é claramente inspirado nos métodos de enxame. A metaheurística é orientada para problemas contínuos de otimização matemática, mas também existem versões para problemas discretos [Xin, 2010].

Vaga-lumes são insetos que emitem luz para atrair parceiros e presas. O grau de atração é proporcional à intensidade da fonte de luz, e a exploração metafórica desse fenômeno está no cerne das metaheurísticas, conforme explicado a seguir.

A metaheurística *Firefly* considera uma colônia de n vaga-lumes virtuais, identificados por um índice i entre 1 e n . Os vagalumes são inicialmente distribuídos aleatoriamente em um determinado espaço de busca \mathcal{S} . Na iteração t da pesquisa, o vaga-lume i ocupa a posição $x_i(t) \in \mathcal{S}$.

Assume-se que uma dada função objetivo f é definida no espaço de busca e o objetivo é maximizar (ou minimizar) f . Para isso, cada vaga-lume i emite luz com intensidade I_i , que depende da adequação do ponto de busca ocupado por i . Normalmente, $I_i(t)$ é definido da seguinte forma [Chopard e Tomassini]

$$I_i(t) = f(x_i(t)) \quad (2.15)$$

O algoritmo tem as seguintes etapas: em cada iteração t passa por todos os pares de vaga-lumes $(i; j)$ com $1 \leq i \leq n$ y $1 \leq j \leq n$ e compara suas intensidades de luz. Se $I_i < I_j$ então o vaga-lume i se move em direção ao vaga-lume j de acordo com a intensidade da atração.

Observe que a posição do vaga-lume i é atualizada imediatamente, o que significa que se poderia mover várias vezes, por exemplo, após comparar as intensidades de i y j e entre i e k .

A força de atração A_{ij} do vaga-lume i ao vaga-lume j , que possui mais luminosidade, corresponde à intensidade percebida por i . É definido assim:

$$A_{ij} = \beta_o * e^{(-\gamma * r_{ij}^2)} \quad (2.16)$$

onde r_{ij} é a distância entre x_i y x_j . A atração, portanto, diminui exponencialmente à medida que a distância entre dois vaga-lumes aumenta, um efeito que simula o fato de que a intensidade percebida enfraquece à medida que a distância aumenta.

As quantidades β_o e γ são parâmetros livres adequados. Escrevendo o argumento exponencial como $(r_{ij}/\gamma^{-1/2})^2$ pode-se ver que o fator $\gamma^{-1/2}$ fornece uma escala de distância. Geralmente, γ [0:01; 100] é escolhido com base nas unidades do x_i . O parâmetro β_o dá a atração A_{ij} a uma distância zero e geralmente é definido como $\beta_o = 1$.

O deslocamento do vaga-lume i em direção ao vaga-lume j é definido por uma parte atrativa determinada pelas intensidades de luz relativas e uma parte aleatória. A posição atualizada x'_i é dado pela expressão

$$x'_i = x_i + \beta_o * EXP(-\gamma r_{ij}^2)(x_j - x_i) + \alpha \left(rand_d - \frac{1}{2} \right) \quad (2.17)$$

onde $rand_d$ é um vetor aleatório d -dimensional cujos componentes pertencem a $[0; 1]$. O parâmetro é normalmente escolhido como α $[0; 1]$ e entende-se que o produto é feito por componentes.

O algoritmo que acabamos de discutir pode ser descrito pelo seguinte pseudocódigo:

Modelo de algoritmo Firefly

```

iteração = 0
Comece a população de vaga-lumes  $x_i, i = 1, \dots, n$ 
A intensidade da luz  $I_i$  a  $x_i$  é dado por  $f(x_i)$ 
Enquanto iteração < Max fazer
  para  $i = 1$  a  $n$ 
    para  $j = 1$  a  $n$ 
      se  $I_i < I_j$  logo
        vaga-lume  $i$  se move em direção a  $j$ 
        atualizar distâncias  $r_{ij}$  e a intensidade  $I_i$ 
        atualize a atração de acordo com as novas distâncias
      Terminar condição
    Terminar condição
  classificar os vaga-lumes e atualizar a melhor solução atual
  iteração = iteração + 1
Terminar condição

```

Figura 2.14 – Modelo de algoritmo *Firefly*

Este algoritmo oferece a vantagem de que o ótimo global pode ser encontrado, bem como um mínimo local de forma simultânea e eficiente. Uma vantagem adicional do algoritmo é que funciona quase de forma independente, ou pode ser aplicado em paralelo [Ontiveros, 2014].

2.6.2.4 Simulated Annealing

O *Simulated Annealing* (SA) é uma técnica de otimização desenvolvida em 1983 por Kirkpatrick et al. Seu nome deriva do processo de recozimento do metal onde o material é levado a uma alta temperatura e então resfriado lentamente para obter um sólido livre de defeitos, da mesma forma, o Simulated Annealing permite uma diminuição controlada da taxa de resfriamento, o que tem influência na probabilidade de aceitação de uma solução.

O *Simulated Annealing* pertence ao grupo dos algoritmos de busca local, também é classificado como uma técnica estocástica uma vez que seu processo para determinar a otimização global de um problema é realizado através de uma busca aleatória.

Dentre as características desse algoritmo está a habilidade de evitar ficar preso no ótimo local, foi demonstrado que através de suficientes processos aleatórios e baixos valores da taxa de resfriamento, o *Simulated Annealing* converge para o ótimo global. Este algoritmo é um método de pesquisa que utiliza uma cadeia de Markov, que converge nas condições adequadas.

Quanto à sua probabilidade de transição, a cadeia de Markov não só permite mudanças para melhorar a variável a ser otimizada, mas também permite aceitar valores não ideais [Laarhoven e Aarts, 2010].

A probabilidade de transição desta técnica de otimização é expressa como

$$p = e^{-\frac{\Delta f}{T}} \quad (2.18)$$

onde Δf é a diferença entre a função objetivo e T é a variável de controle, que diminui à medida que o processo avança.

Se a solução encontrada satisfizer a condição de otimização, ou seja, se a solução estiver sendo melhorada, esta solução é aceita, caso contrário, se a referida solução não representar uma melhoria da função objetivo, utiliza-se a equação apresentada acima, o valor obtido a partir

de a referida equação é comparada com um valor numérico aleatório r , se o valor de probabilidade obtido for maior que o valor numérico aleatório, como se mostra na Equação 2.13 (um número entre 0 e 1) a solução é aceita, caso contrário, a solução inicial será novamente considerada como valor a comparar.

$$p = e^{-\frac{\Delta f}{T}} > r \quad (2.19)$$

A principal característica do SA é que para estados iniciais quando a variável de resfriamento é alta, são permitidas soluções que não melhoram a função objetivo, à medida que as iterações passam, a variável de resfriamento torna-se menor e ao usar a função de probabilidade, apenas soluções que melhoram a função objetivo será aceita, desta forma o algoritmo evita ficar preso no ótimo local [Aarts e Korst, 1997].

As diferentes etapas incluídas no algoritmo SA são apresentadas na figura 2. 16.

Modelo del algoritmo Simulated Annealing

Entrada: Cronograma de Resfriamento

$s = s_0$; /* Geração de uma solução inicial */

$T = T_{Max}$; /* Temperatura inicial */

Repetir

Repetir /* A uma certa temperatura */

Gerar um vizinho aleatório s' ;

$\Delta E = f(s') - f(s)$;

Se $\Delta E \leq 0$ **logo** $s = s'$ /* Aceitação da nova solução */

No caso contrário Aceite com probabilidade $e^{-(\Delta E/T)}$;

Até a condição de equilíbrio

/* por exemplo, um número especificado de iterações para cada temperatura */

$T = g(T)$; /* Atualização de temperatura */

Até que o critério de parada seja satisfeito /* exemplo : $T < T_{Min}$ */

Resultado: Melhor solução encontrada.

Figura 2.15 – Modelo de algoritmo SA

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados alguns estudos relacionados ao desenvolvimento, implementação e evolução de alguns dos dissipadores metálicos mais comuns, também são apresentados estudos relacionados à otimização da resposta dinâmica de estruturas utilizando diferentes tipos de algoritmos de otimização e diferentes tipos de dissipadores e, por fim, são apresentados uma série de trabalhos que aplicam técnicas de otimização para melhorar o desempenho de dissipadores metálicos.

3.1 Dissipadores Metálicos

Os primeiros dissipadores metálicos de aço foram propostos por Kelly et al., em sua pesquisa realizada em 1972, neste trabalho são propostos três tipos de dispositivos, os quais foram apresentados na Figura 2.5.

O primeiro dispositivo, é projetado para ser instalado entre paredes de cisalhamento de base flexível em um edifício composto, o dispositivo opera entre superfícies adjacentes com movimentos relativos paralelos.

O segundo dispositivo apresentado usa uma combinação de barras quadradas ou retangulares de torção e flexão, ele está localizado entre superfícies que se movem para frente e para trás. Sua capacidade de dissipação torna-se muito alta.

Por último, o último modelo desenvolvido funciona através do processo de flexão de vigas retangulares e curtas, este dispositivo é ideal para ser instalado entre as travessas diagonais em estruturas de aço ou concreto armado para absorver energia na área próxima ao conjunto viga-coluna.

Três anos depois, Skinner et al., 1975, apresenta dois novos modelos de dissipador metálico apresentados na Figura 3.1. O primeiro modelo foi o dissipador de viga de flexão, este dispositivo é uma seção em viga que pode ser quadrada ou circular, entre suas características está a capacidade de suportar cargas em duas direções perpendiculares ao eixo da viga. Estes

dissipadores são projetados para serem instalados com base flexível e têm como objetivo amortecer as excitações na base da estrutura.

O segundo modelo proposto foi o dissipador de eixo único, este dispositivo suporta uma grande quantidade de carga ao longo de um único eixo, várias vigas podem ser instaladas juntas para formar um dispositivo mais compacto, ele é instalado como um elemento diagonal em pórticos estruturais flexíveis.

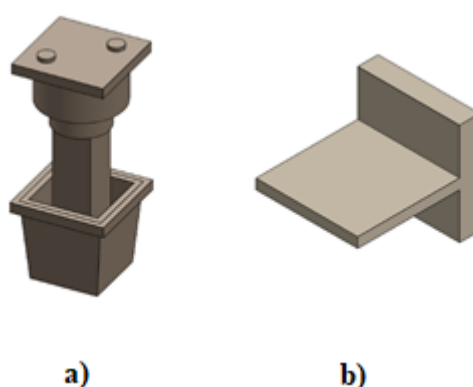


Figura 3.1 – Dissipadores metálicos Skinner et al., 1975. a) dissipador de viga de flexão b) dissipador de eixo único

Continuando com a evolução dos dissipadores metálicos, Takeda et al., 1976, desenvolveu um dos dissipadores mais populares da atualidade, o BRB, que foi apresentado na seção anterior, posteriormente, foram feitas modificações no projeto inicial alterando a seção transversal da cobertura.

Bergman em 1983 propôs o projeto do famoso dissipador metálico conhecido como ADAS, que serviria de inspiração para Tsai et al., 1993, desenvolver o dispositivo TADAS dez anos depois. Ambos os modelos de dissipadores são instalados em pórticos estruturais flexíveis e compartilham sua principal característica, proporcionando tanto rigidez quanto amortecimento ao membro estrutural.

Nakashima et al., 1994, propõem um novo modelo de dissipador de energia para aplicações em estruturas, este dispositivo é conhecido como painel de cisalhamento (*SPD Shear Panel Damper*), o projeto proposto é basicamente uma placa de aço de baixo ponto de escoamento (120 MPa), a placa é soldada em suas extremidades a chapas de aço convencionais que permitem a condição de cisalhamento puro no painel.

Neste estudo, ele propõe três alternativas para a placa principal ou painel, em primeiro lugar, considera-se uma placa simples, depois são acrescentados dois reforços verticais e, por fim, o terceiro modelo contém duas reforços verticais e dois reforços horizontais como é mostrado na Figura 3.2.

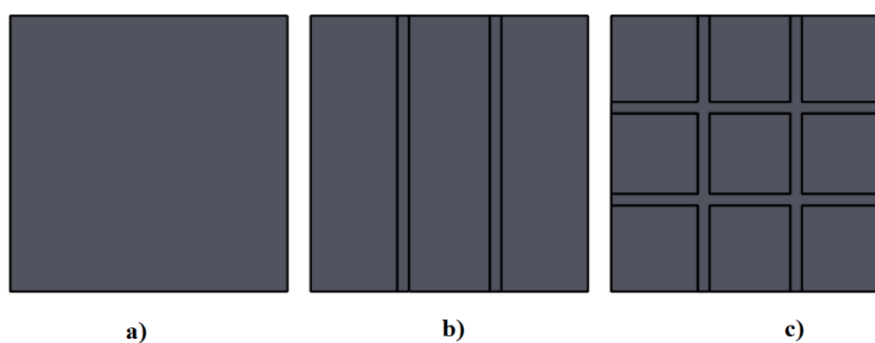


Figura 3.2 – Dissipador de cisalhamento proposto por Nakashima et al., 1994. a) sem reforço
b) reforços verticais c) reforços verticais e horizontais

O protocolo de carregamento de carregamento é aplicado à borda superior e consiste em um carregamento cíclico de 3 repetições de 3, 9, 15 e 20 mm. A partir dos ensaios realizados, obteve-se que os modelos de dissipadores que possuíam reforços apresentaram maior capacidade de dissipação, o que permite notar a importância dos reforços, pois evitam o aparecimento de deformações fora do plano em ciclos de baixo deslocamento, também foi observado que, com relação aos dissipadores do mesmo tipo gerados com o aço convencional, a deformação até a condição de falha por rompimento é cerca de 2 vezes maior.

Chan e Albernamí 2008, apresentam o dissipador de aço ranhurado (SSD *Steel Slit Damper*) que consiste em uma peça de aço com uma série de cortes, que foram arredondados para reduzir a concentração de esforços. Nesta pesquisa 8 modelos de dissipadores com diferentes dimensões e com modificações no tamanho das ranhuras são gerados, no entanto, todos os dispositivos têm a mesma espessura (8 mm).

A Figura 3.3 mostra a geometria base do dissipador proposto no estudo de Chan e Albernamí, 2008.

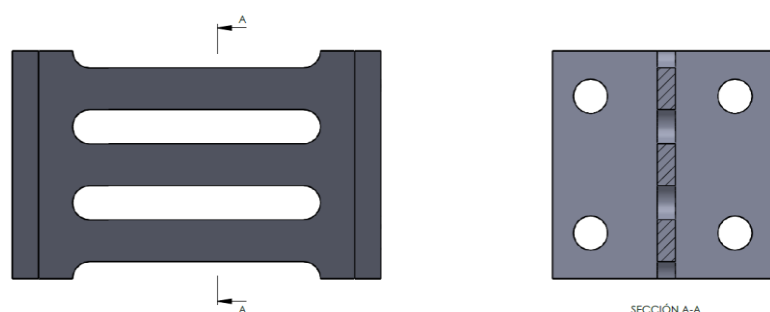


Figura 3.3 – SSD proposto por Chan e Albernamí

Os dissipadores foram submetidos a ensaios de deslocamento cíclico, três ciclos foram realizados em cada amplitude: 0,5, 1,0, 1,5, 2,5, 5,0, 7,5, 10,0, 12,5, 15,0 e 20,0 mm. Os testes foram realizados até que apresentassem evidências de falha, a falha por ruptura que os dissipadores apresentavam foi devido à deformação plástica excessiva nas áreas próximas às ranhuras, no caso de projetos que combinam ranhuras de diferentes medidas, o a falha ocorre nas bordas da ranhura menor.

Em relação ao comportamento histerético, todos os dispositivos apresentaram comportamento estável, atingindo uma capacidade de dissipação entre 6,92 e 10,3 kJ, também foi observado que os dissipadores que apresentaram maior relação b / l_o alcançaram maior capacidade de carga de escoamento.

Um ano depois, Chan et al., 2009, fizeram uma nova proposta para um dissipador de energia, o dispositivo é denominado YSPD (*Yielding Shear Panel Damper*) e consiste em uma

seção tubular de aço quadrada, que possui uma placa interna feita de aço de baixo ponto de escoamento, esta placa está localizada no meio da profundidade da seção tubular. As dimensões das seções tubulares são iguais às da placa, como a seção tubular é mais rígida do que a placa interna, a condição de cisalhamento puro é apresentada na placa.

A Figura 3.4 apresenta o dissipador proposto em Chan et al., 2009.

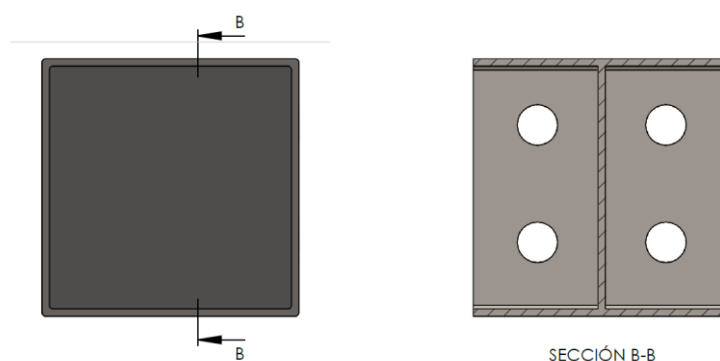


Figura 3.4 – Dissipador YSPD proposto por Chan et al., 2009

Para a análise do comportamento deste dispositivo, foram feitas três variações na espessura das placas, os modelos foram submetidos a ciclos de carga repetindo três vezes cada uma das amplitudes, o protocolo de carregamento consistiu em deslocamentos com amplitudes de 0,5, 1,0, 3,0, 5,0, 10,0 e 20,0 mm e embora todos os modelos gerados apresentassem bom comportamento, verificou-se que os modelos com maior índice de esbeltez apresentaram maior dissipação de energia.

Maleki e Bagheri, 2010 utilizam seções tubulares circulares de aço para determinar o seu comportamento histerético e sua aplicação como dissipadores de energia em estruturas. São utilizadas duas alternativas de dissipadores, a primeira consiste em uma seção tubular preenchida com concreto e a segunda é o mesmo dispositivo, mas sem o referido enchimento, o dissipador é denominado dissipador tubular I (*Pipe Damper PD*), ambos os modelos são submetidos a cargas de corte cíclicas. Além disso, o procedimento é simulado por elementos finitos para determinar a influência das dimensões no comportamento do dispositivo.

A Figura 3.5 mostra a representação do dissipador analisado e sua instalação para testes de laboratório.

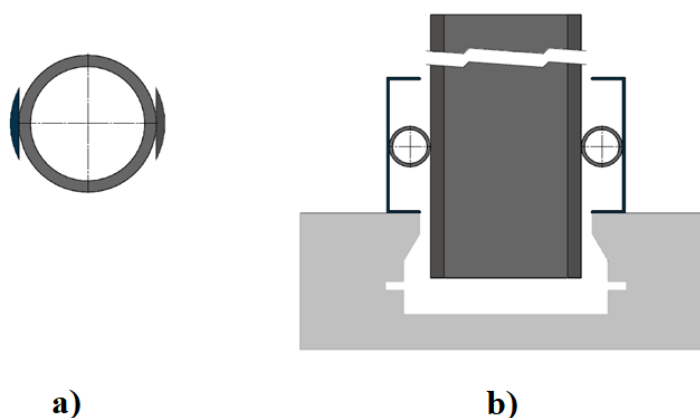


Figura 3.5 – Modelo de dissipador proposto por Maleki e Bagheri, 2010. a) dissipador tubular
b) representação de instalação em laboratório

Determinou-se que o enchimento de concreto representa uma desvantagem para o dissipador proposto, pois quando o concreto falha, o comportamento histerético do dispositivo não é estável, embora a seção tubular não apresente sinais de falha, porém, a falha do enchimento isso provoca uma degradação repentina tanto da resistência quanto da rigidez do sistema, por outro lado, o dissipador não preenchido apresentou comportamento estável com boa dissipação de energia.

A partir da análise paramétrica, determinou-se que tanto a rigidez quanto a resistência do dispositivo aumentam de forma linear com o aumento do comprimento do dissipador e de forma não linear com o aumento da espessura ou com a diminuição do diâmetro.

Maleki e Mahjoubi, 2013 apresentam uma variação do dissipador tubular, desta vez são utilizadas duas seções tubulares ao invés de uma, este dispositivo é denominado dissipador tubular duplo (*Dual Pipe Damper DPD*), o dispositivo apresenta bom comportamento de histerese e grande ductilidade.

Os dispositivos avaliados apresentaram fluência em pequenos deslocamentos, foi estabelecido que o dispositivo possui uma maior capacidade de dissipação de energia em relação aos dissipadores do mesmo tamanho como o SSD, também foi observado que, comparado ao PD, o DPD apresenta sinais de falha quando ser submetido a uma força 4 vezes maior.

Abebe et al., 2013, fazem a comparação de um dissipador tubular vertical fabricado com aço de baixo ponto de escoamento (LYPS *Low Yielding Point Steel*) e um similar feito com aço convencional, em seu trabalho é proposto que o tamanho efetivo para este tipo de dissipador é quando a relação entre a altura do dispositivo e seu diâmetro tem um valor de $\sqrt{3}$, este valor é obtido assumindo o aparecimento simultâneo de tensões de flexão e cisalhamento.

A comparação desses dispositivos é realizada através da aplicação de cargas cíclicas tanto em ensaios de laboratório quanto em análise por elementos finitos, o ponto de escoamento para o aço convencional utilizado é de 369 MPa enquanto para o aço com baixo ponto de escoamento tem o valor de 202,6 MPa. A Figura 3.6 apresenta o modelo do dispositivo usado no estudo de Abebe et al., 2013.

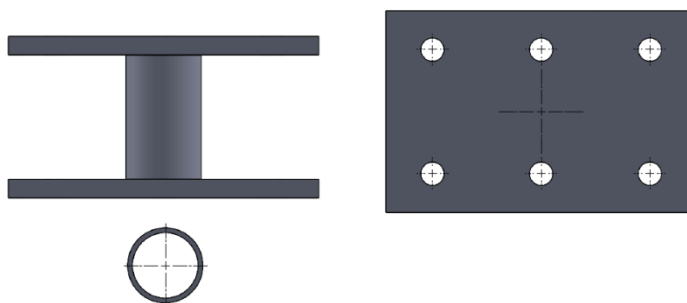


Figura 3.6 - Representação do dissipador de calor tubular vertical usado por Abebe et al., 2013

Obteve-se que o dissipador fabricado com LYPS resistiu a mais ciclos de carga e obteve maior dissipação de energia, os resultados obtidos por meio da análise de elementos finitos foram consistentes com testes de laboratório.

Sahoo et al., 2015, apresentam um dispositivo baseado na união de dois dissipadores, um que opera por flexão e outro por corte, o SAFYD (*Shear And Flexural Yielding Damper*) é um dissipador que combina painéis de corte com o sistema ADAS. Este dispositivo consiste em um painel de corte que é reforçado em suas extremidades com duas placas de aço em forma de X (ADAS) conforme mostrado na Figura 3.7.

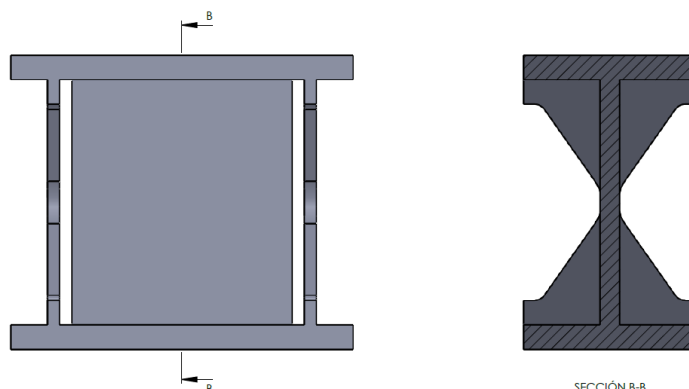


Figura 3.7 - Dissipador SAFYD

A flexão inelástica e as deformações por cisalhamento das placas resultam em um aumento tanto na resistência lateral quanto na dissipação de energia. Se for comparado o comportamento individual dos elementos que compõem o sistema, foi determinado que um aumento na espessura de qualquer uma das placas leva para aumentar a resistência do dispositivo.

Abebe et al., 2015, avaliam o comportamento histerético e modos de falha de dissipadores de painel de cisalhamento (SPD) fabricados com aço de baixo ponto de escoamento (LYPS), a placa principal é fabricada com LYPS e os acessórios adicionais com aço convencional.

Para avaliar os modos de falha, são gerados vários modelos com variações em suas espessuras, foi aplicado um teste quase estático aos dispositivos, além de uma análise de elementos finitos para complementar o estudo.

Como resultado, três tipos de falha foram determinados nos modelos colocados em teste, o primeiro modo de falha é apresentado nos dissipadores de menor espessura, este modo de falha é caracterizado por apresentar flambagem fora do plano na área central da placa, o segundo modo de falha está localizado nos cantos da placa e, finalmente, o terceiro modo de falha ocorre na junta soldada da placa com os flanges laterais. Os modos de falha são apresentados na Figura 3.8.

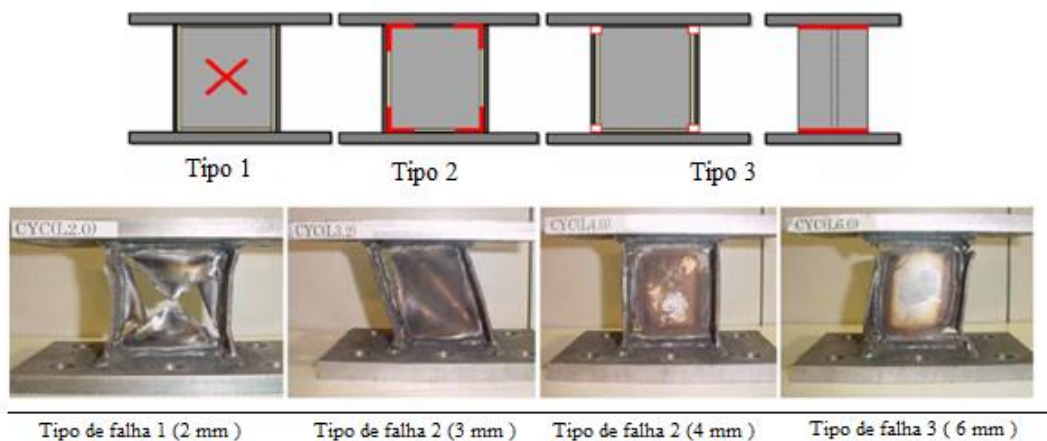


Figura 3.8 - Modos de falha do dissipador SPD de acordo com sua espessura
[Adaptado de Abebe et al., 2015]

Abebe et al., 2018, avaliam o comportamento de histerese de um VPD feito com aço de baixo limite de escoamento, neste estudo são realizados testes quase estáticos além de uma análise de elemento finito onde é simulado o teste feito no laboratório e busca para analisar o efeito das dimensões no comportamento do dispositivo.

Para desenvolver o processo são gerados 3 modelos de dissipador com três razões D/t diferentes variando-se a espessura do cilindro pero mantendo o tamanho efetivo apresentado por Abebe et al, 2013.

A Figura 3.9 apresenta o estado final e a distribuição das tensões nos modelos analisados utilizando elementos finitos, observa-se que a distribuição das forças como o modo de flambagem é diferente dependendo da relação entre o diâmetro e a espessura do dispositivo.

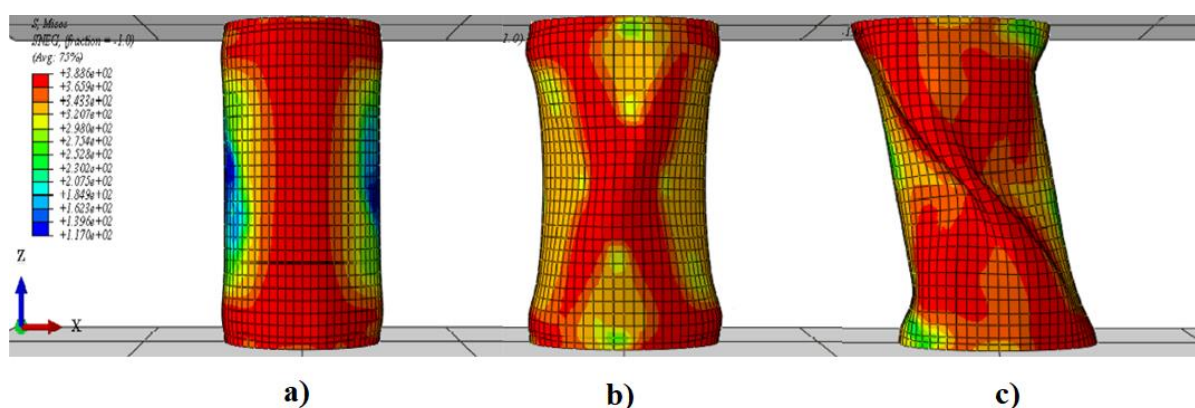


Figura 3.9 - Distribuição das tensões e estado final dissipador VPD com D/t a) 19,4 b) 27,8 c) 48,6 [Adaptado de Abebe et al., 2018]

Foi determinado que para as relações $D/t > 27,8$ ocorrem severas deformações fora do plano, que se refletem em instabilidades em seu comportamento de histerese e, portanto, em uma diminuição em sua capacidade de dissipação de energia.

Analisando o EPS do dispositivo, determinou-se que a seção efetiva para este tipo de dispositivo ocorre quando a razão D/t está entre 10 e 20, pois os menores índices de EPS estão presentes entre esses valores e como já havia sido mencionado, este parâmetro está relacionado à falha neste tipo de dispositivo.

3.2 Aplicação de Algoritmos Metaheurísticos para Otimização de Amortecedores

Ontiveros, 2014, apresenta um método de otimização de amortecedores de fricção em estruturas utilizando o algoritmo de otimização *Firefly*, a metodologia é proposta para dois edifícios de nove e dezesseis andamentos submetidos a cargas sísmicas. O objetivo é melhorar a resposta dinâmica da estrutura reduzindo o valor do deslocamento máximo no topo da estrutura, otimizando as localizações dos dispositivos na estrutura, para isso foi estabelecido um número máximo de amortecedores para cada um dos edifícios, sendo quatro para a estrutura de 9 camadas e seis para o edifício de dezesseis andares.

Como resultado, obteve-se uma diminuição de mais de 50% do deslocamento lateral no topo do edifício para ambas as estruturas.

Vellar, 2017, propõe uma metodologia de otimização de amortecedores de massa sintonizados, para estruturas submetidas a cargas dinâmicas, utilizando dois algoritmos de otimização para este objetivo. Os algoritmos usados foram o algoritmo *Firefly Algorithm* e o algoritmo *Backtracking Search Optimization Algorithm*, o objetivo é reduzir o deslocamento lateral no topo da estrutura usando inicialmente apenas um amortecedor na parte superior do edifício e gerando várias alternativas em termos de número, localização e características do dispositivo como razão de massa, rigidez e amortecimento. O procedimento foi desenvolvido no software de programação Matlab e a resposta dinâmica da estrutura é obtida resolvendo as equações de movimento pelo método de integração direta.

A proposta implementada conseguiu gerar uma diminuição na resposta da estrutura em torno de 65% após a instalação do amortecedor previamente modificado, adicionalmente, ambos os algoritmos implementados apresentaram resultados confiáveis.

Berastegui, 2020 apresenta uma metodologia para a otimização de pórticos de aço submetidos a cargas sísmicas por meio do aprimoramento do uso de amortecedores viscosos seguindo as recomendações sobre as limitações de deslocamento estabelecidas na *Specification for Structural Steel Buildings ANSI / AISC 360-16, 2016*. No desenvolvimento do trabalho, é implementado o algoritmo de otimização da evolução diferencial. A metodologia é desenvolvida interagindo com o *software* Matlab, onde são desenvolvidas as rotinas computacionais e o *software* *OpenSees* para analisar as respostas da estrutura.

Por fim, através da proposta apresentada, foi possível reduzir a deriva máxima nos pórticos em mais de 65% e em cerca de 60% do deslocamento na parte superior 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% [Berastegui, 2020].

Utilizando o *Whale Optimization Algorithm*, Brandão, 2021, propõe a metodologia de otimização dos parâmetros de projeto e posições de amortecedores dinâmicos sincronizados

destinados à aplicação em estruturas como sistema de controle de vibração. O objetivo do projeto era reduzir o deslocamento relativo entre os andares do edifício. Nesta proposta, foram utilizadas 3 estruturas de seis, dez e vinte e dois andares respectivamente, os edifícios foram submetidos a 4 excitações dinâmicas e foram propostas 4 possibilidades de localização dos dispositivos. O critério de aceitação do deslocamento permitido foi baseado nas recomendações estabelecidas na norma técnica ANSI / AISC 360-16, os dispositivos foram sincronizados com a frequência fundamental das estruturas analisadas.

Brandão, 2021, concluiu que a melhor forma de otimizar as respostas às estruturas analisadas foi por meio da proposição número 4 em que os dispositivos estavam localizados no plano do edifício.

3.3 Otimização de Dissipadores Metálicos

Ghabraie et al., 2010, realizam a otimização da forma do modelo de dissipador proposto por Chan e Albernamei, 2008, para este objetivo é utilizado o algoritmo de otimização estrutural evolutivo bidirecional (BESO), a função objetivo utilizada no algoritmo é a dissipação de energia plástica, que deve ser aumentado à medida que o processo de otimização se desenvolve. Como resultado do processo de otimização, determinou-se que o formato do diamante nas ranhuras proporciona maior dissipação de energia para estes dispositivos, também foi obtido que ao otimizar o modelo com o melhor desempenho obtido por Chan e Albernamei 2008 e submetendo ao mesmas condições de carga, o dispositivo gerado pelo processo de otimização apresenta um aumento de 37% na capacidade de dissipação de energia.

A Figura 3.10 apresenta a comparação da distribuição de tensões entre uma configuração inicial do modelo e o resultado otimizado para essa configuração.

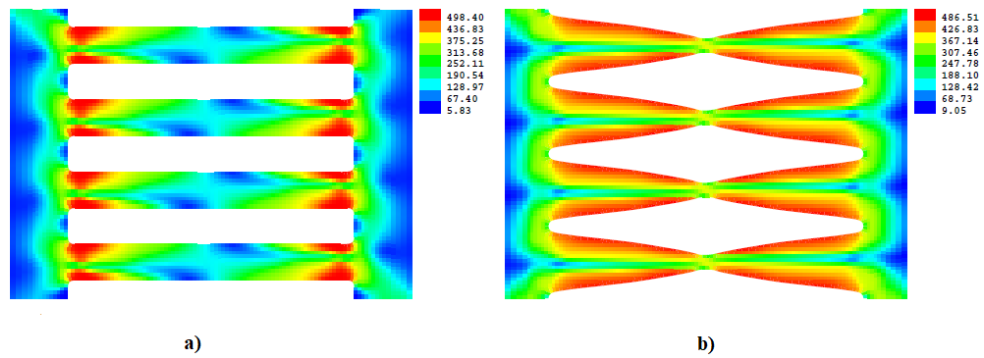


Figura 3.10 - Distribuição de tensões no dissipador SSD a) modelo inicial b) modelo otimizado [Adaptado de Ghabraie et al., 2010]

Como o modelo proposto inicialmente para o YSPD apresentava deformações indesejadas no sistema, Chan et al., 2013, incorporaram uma série de furos na placa de aço para analisar o desempenho, uma vez que as deformações presentes no modelo anterior fizeram que o comportamento de histereses do dispositivo apresenta picos de instabilidade que, embora não significativos, não permitiam o aproveitamento total do dissipador.

Para resolver esta situação, a placa central do dispositivo foi perfurada com 3 tipos diferentes de orifícios conforme mostrado na Figura 3.11, este dispositivo é conhecido como painel de corte perfurado (*Perforated Yielding Shear Panel Damper PYSPD*).

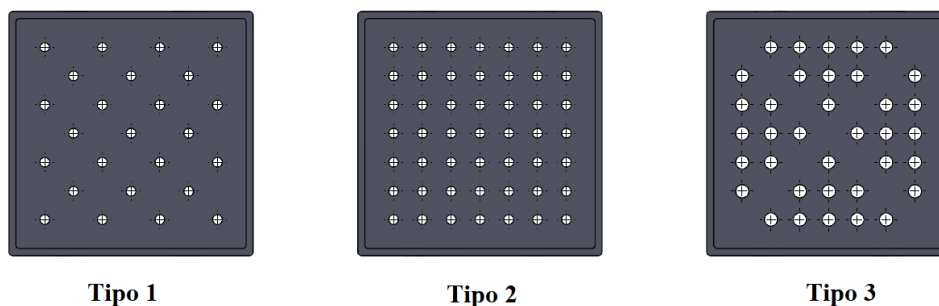


Figura 3.11 – Tipos de orifícios tipos de furos usados no dissipador PYSPD

Durante esta investigação, determinou-se que os dispositivos que continham perfurações do tipo 2 eram os que apresentavam maior capacidade de dissipação de energia e os do tipo 3 os que apresentavam o pior desempenho.

Deng et al., 2014, apresentam o processo de otimização da forma de um dissipador de painel cortante de aço (SPD), este dispositivo é o mesmo apresentado por Nakashima et al., 1994. O objetivo desta pesquisa é melhorar o desempenho de fadiga de baixo ciclo do dispositivo por meio de um processo de otimização.

Para tanto, é utilizado o algoritmo SA e a função objetivo utilizada é a minimização da deformação plástica equivalente (EPS *Equivalent Plastic Strain*), a qual está associada à falha do sistema. O processo consiste no aproveitamento do material do dissipador, pois um modelo inicial é utilizado e conforme o processo de otimização avança, são retiradas as áreas que apresentam maiores valores de EPS, esses valores são obtidos através da análise de elementos finitos no software Abaqus. Durante a análise, foram projetados três protótipos com variações na largura da placa, os protótipos foram submetidos a cargas cíclicas com amplitude máxima de 20 mm.

A Figura 3.12 apresenta a comparação da EPS no dissipador proposto por Nakashima et al., 1994, e o resultado otimizado gerado por Deng et al., 2014, do mesmo dispositivo.

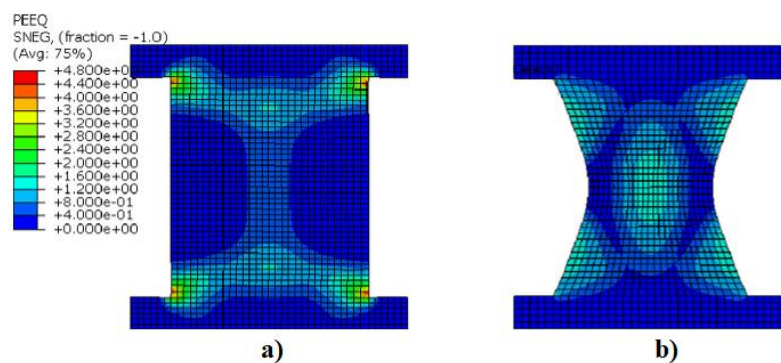


Figura 3.12 - Comparação da EPS dos modelos a) inicial b) otimizado [Adaptado de Deng et al., 2014]

Como resultado, obteve-se que os modelos otimizados apresentaram uma diminuição de 30% na deformação plástica equivalente e uma dissipação de energia em torno de 90% do modelo inicial, além disso foi determinado que o EPS não depende da largura do dispositivo.

Ferrer, 2017 realiza o processo de otimização da forma de um dissipador de placa metálica, o processo de otimização é realizado utilizando o software de elementos finitos Abaqus, a linguagem de programação Python, o algoritmo de *Simulated Annealing* e o algoritmo *Simulated Annealing* modificado.

O dispositivo é composto por uma placa ranhurada, essas ranhuras são de formas diferentes e representam uma quantidade específica de volume de material, todas as ranhuras representam a mesma quantidade de material removido. A Figura 3.13 apresenta as configurações iniciais utilizadas neste estudo.

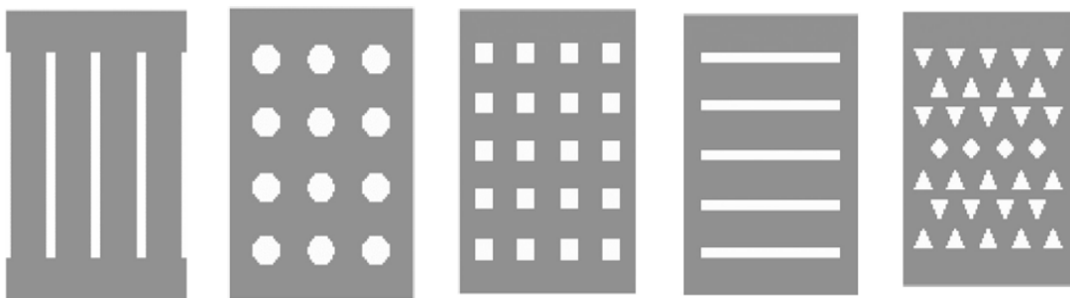


Figura 3.13 - Configurações iniciais do dissipador de placa metálica [Adaptada de Ferrer, 2017]

O processo começa com o modelo ranhurado selecionado, em seguida é realizada a análise de elementos finitos onde são aplicadas as restrições e o protocolo de carga, a partir da análise de elementos finitos são extraídos os dados de energia dissipada e os esforços no dispositivo, posteriormente modificando as posições dos elementos vazios, outro modelo é criado ao qual o mesmo procedimento é aplicado.

Tendo os dados da energia dissipada de dois modelos, é aplicado o algoritmo Simulated Annealing onde serão compradas as energias de cada um deles e uma das configurações é selecionada para sua modificação.

Após selecionar uma das configurações, analisa-se a distribuição dos esforços nos elementos com material do modelo, para cada um dos elementos é criado um valor de probabilidade que é a razão entre o esforço no elemento e o esforço máximo em todo o modelo, se este valor for menor que o critério de modificação, este elemento é modificado para não conter material e de forma semelhante para posições vazias será gerada uma probabilidade de atribuir material a eles.

O modelo otimizado é obtido a partir da maximização da capacidade de dissipação de energia do dispositivo para o protocolo de carga aplicado e da movimentação do material em busca de uma configuração que alcance uma distribuição uniforme de esforços ao longo do dissipador, o que representa um melhor aproveitamento do material e maior capacidade de dissipação.

O modelo otimizado por Ferrer, 2017 é baseado nas dimensões apresentadas no trabalho de Ghabraie et al., 2010, e o modelo de ranhuras verticais corresponde ao mesmo que foi otimizado por ele, ao comparar os dois modelos otimizados de ambos os autores se observou que os modelos obtidos por Ferrer (2017) apresentaram maior dissipação de energia.

É importante esclarecer que a áreas efetiva para modificação entre as propostas de otimização são diferentes e a proposta apresentada por Ferrer, embora as dimensões dos modelos sejam as mesmas, a área efetiva para otimização é maior do que a utilizada por Ghabraie et al., 2010.

Utomo et al., 2017, apresenta uma proposta de dissipador tubular vertical (VPD) para a melhoria do desempenho sísmico de pórticos estruturais, ao analisar o comportamento do VPD quando submetido a uma carga cíclica, observou-se que o dispositivo sofre flambagem nas extremidades onde é conectado aos membros estruturais, devido a isso, um reforço é levantado nas laterais do dissipador.

Neste estudo, foram utilizados dois tipos de reforços que são soldados nas laterais do dispositivo, a primeira alternativa de reforço consiste em placas em formato trapezoidal, enquanto a segunda corresponde a placas em formato curvo conforme Figura 3.14.

Com a utilização dos reforços foi possível eliminar a flambagem nas extremidades do dissipador, evitou-se o surgimento de falhas nas conexões do dispositivo, pois as zonas de falha foram transferidas para os reforços e por fim aumentou a dissipação de energia e o dispositivo conseguiu suportar mais ciclos de carga.

Dentre os reforços introduzidos no dissipador, o modelo com placas curvas apresentou melhor desempenho.

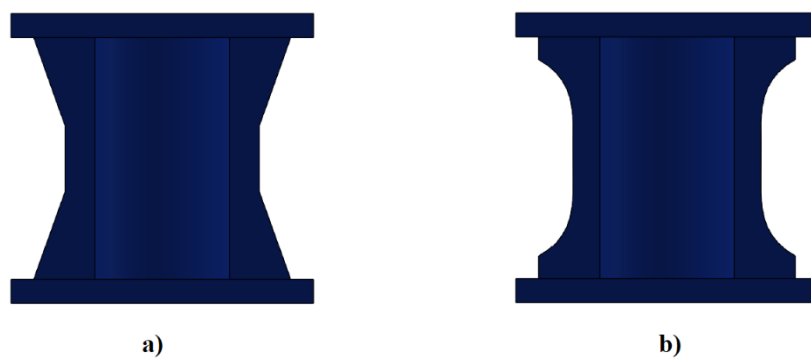


Figura 3.14 - Reforços em dissipador cilíndrico metálico a) placa trapezoidal b) placa curva

4. METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo é apresentada uma descrição de cada uma das etapas envolvidas no processo de otimização do dissipador de energia metálico cilíndrico vazado ranhurado, a descrição do código desenvolvido e as condições estabelecidas em cada parte do processo.

O processo de otimização da forma do dissipador de energia metálico cilíndrico vazado ranhurado visa aumentar a capacidade de dissipação de energia do dispositivo modificando sua configuração inicial. A Figura 4.1 apresenta três configurações iniciais do dissipador de energia metálico cilíndrico vazado ranhurado.

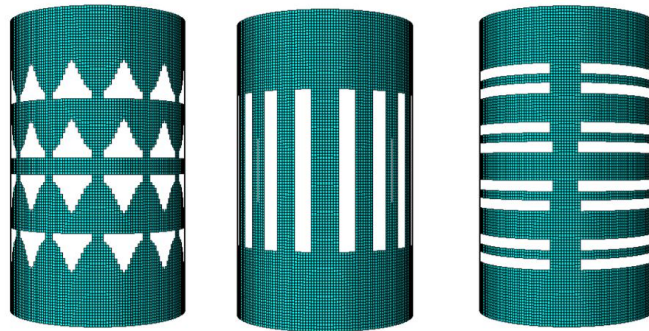


Figura 4.1- Dissipador de energia metálico cilíndrico vazado ranhurado

A metodologia do processo de otimização consiste na utilização do *software* de elementos finitos Abaqus, de onde são extraídos os valores de tensão e dissipação de energia do dispositivo. As instruções executadas pelo *software* de elementos finitos são realizadas através de um código elaborado nesta dissertação usando a linguagem de programação Python.

O código que é executado pelo programa contém as instruções para a criação do dispositivo, as propriedades mecânicas do material utilizado, as condições de contorno a que o dissipador será submetido e o protocolo de carga utilizado. Além das instruções para o algoritmo de otimização SA, também são introduzidos no código as heurísticas que permitirão a modificação do material dos elementos selecionados.

A Figura 4.2 representa o fluxograma desenvolvido no processo de otimização.

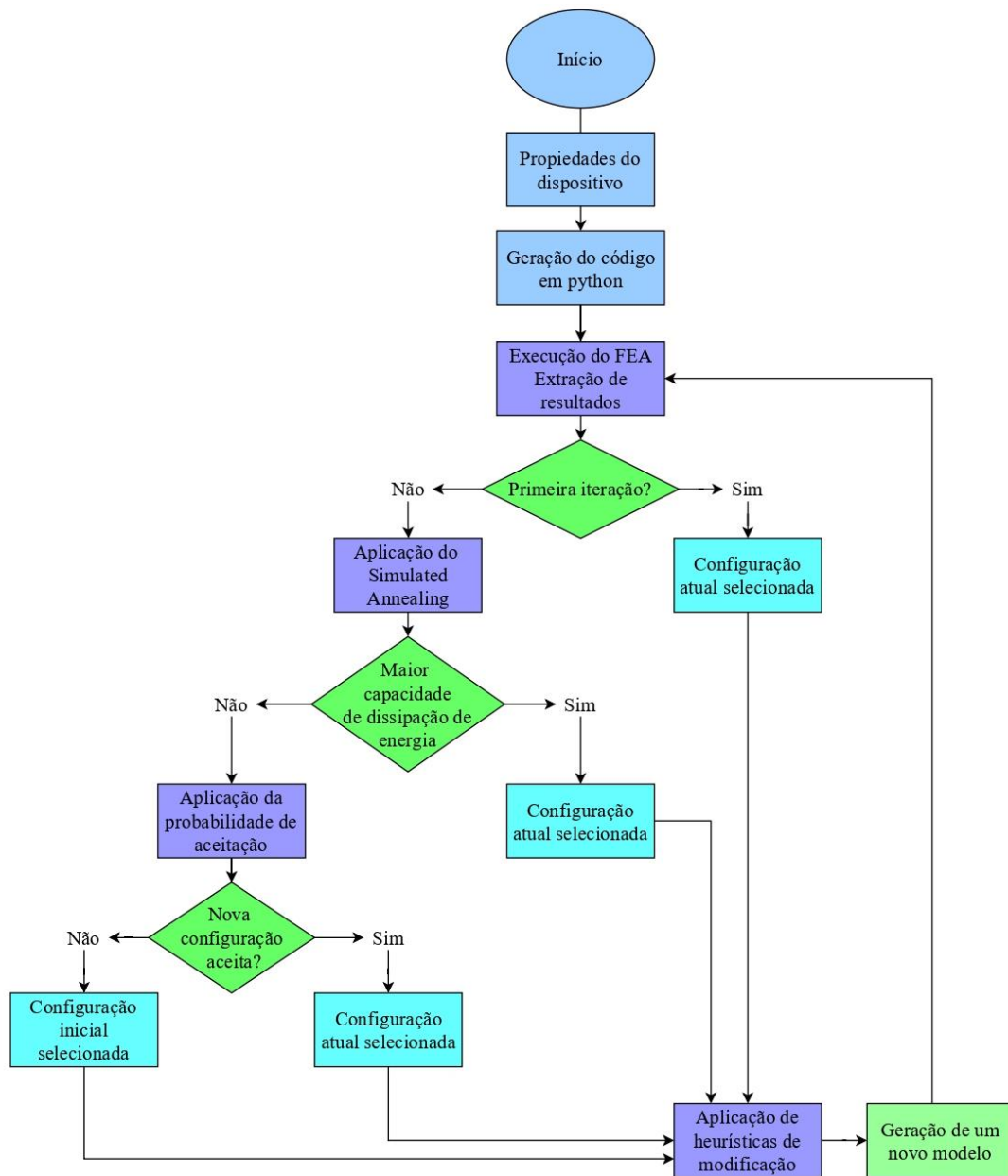


Figura 4.2 -Fluxograma proposto para o processo de otimização para dissipador

O processo de otimização do dissipador cilíndrico ranhurado começa com a determinação das características geométricas do dispositivo, além das propriedades mecânicas do material, condições de contorno, protocolo de carga, tamanho da malha e a lista de elementos de malha que permanecerão vazios no início da análise.

Com essas informações é elaborado o código que será executado no *software* de elementos finitos utilizando a linguagem de programação Python, neste código são integradas as funções do *Simulated Annealing* e as heurísticas que permitem a seleção dos elementos a serem modificados.

Para a execução do *Simulated Annealing* é necessário comparar dois modelos. O modelo inicial é elaborado e o material é atribuído a cada elemento, posteriormente a análise por elementos finitos é aplicada e os dados de dissipação de energia e esforços são analisados para a criação de um novo modelo.

Uma vez identificados os elementos vazios da configuração seguinte, uma nova análise é realizada e os valores da energia dissipada e da distribuição dos esforços no dispositivo são obtidos, então as energias dos dois modelos são comparadas e dependendo da seleção gerada pelo algoritmo, uma nova configuração é criada a partir da seleção, por sua vez a configuração selecionada será utilizada para repetir o processo com o novo modelo gerado. Esse processo se repete dependendo do número de modelos a serem analisados, o ideal é que haja um amplo intervalo de iterações para conseguir a convergência do algoritmo e a melhor distribuição dos elementos vazios.

Como o algoritmo de otimização, assim como as heurísticas de mudança, utilizam uma série de probabilidades, é necessário repetir este processo várias vezes para garantir o melhor resultado possível.

O processo de otimização e as considerações levadas em conta em cada uma das etapas são descritos a seguir.

4.1 Formulação do Problema de Otimização

O problema de otimização estudado neste trabalho consiste em maximizar a capacidade de dissipação de energia de um dissipador de calor cilíndrico metálico com ranhuras, o processo de otimização consiste na redistribuição do material no dispositivo até obter a configuração que proporcione o melhor desempenho do dispositivo.

A formulação do problema de otimização consiste na definição dos elementos envolvidos no processo, em um problema de otimização os seguintes elementos devem ser considerados.

4.1.1 Parâmetros

Os parâmetros em um problema de otimização são todos aqueles fatores que não mudam durante o processo de otimização. As seguintes características foram determinadas como parâmetros no processo de otimização desenvolvido neste trabalho.

4.1.1.1 Características Geométricas

As características geométricas do dissipador são apresentadas na Figura 4.3. As dimensões do modelo foram escolhidas levando-se em consideração a condição de tamanho efetivo apresentada por outros autores que avaliaram este tipo de dissipador [Abebe et al., 2015].

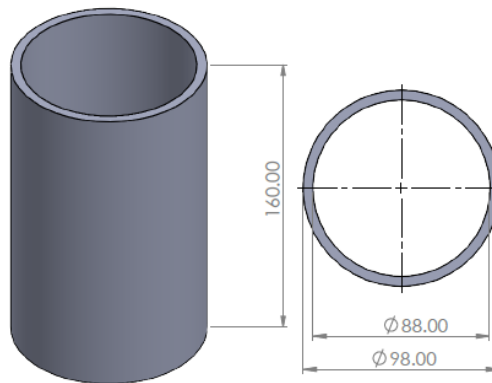


Figura 4.3 - Características geométricas do dissipador cilíndrico (dimensões em mm).

O dispositivo original tem uma altura de 160 mm, um diâmetro externo de 98 mm e uma espessura de 5 mm, resultando em um dissipador de $2,337 * 10^{-4} m^3$, e quando as ranhuras são aplicadas no dispositivo, este passa a ter um volume de $1.799 * 10^{-4} m^3$. Esses parâmetros permitirão fazer uma relação entre a massa e a capacidade de dissipação de energia do

dispositivo, essa relação permite comparar o desempenho entre o modelo original e os modelos otimizados finais.

4.1.1.2 Propriedades Mecânicas do Material

Para o desenvolvimento deste estudo, as propriedades do material utilizado correspondem ao aço convencional utilizado por Abebe et al., 2018. Os valores dos testes de laboratório foram adaptados para implementar a zona plástica do material e inseri-los no *software* de elementos finitos. A Figura 4.4 apresenta a relação tensão-deformação implementada para o processo de otimização, a linha de cor azul representa os valores obtidos nos testes de laboratório, enquanto a linha laranja é a adaptação para implementação no Abaqus.

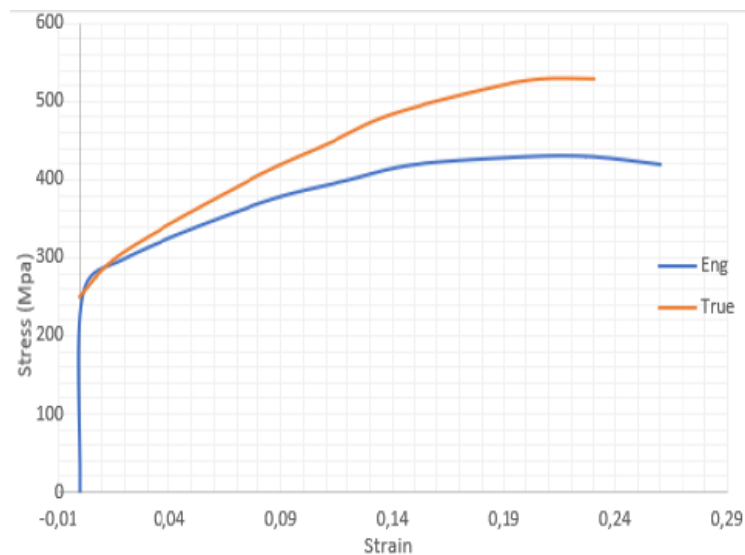


Figura 4.4 - Relação tensão-deformação do aço utilizado

Neste estudo são utilizados dois materiais, um material principal com todas as propriedades mecânicas do aço e um material fraco que representa a ausência de material no dispositivo ou uma área vazia do modelo. As propriedades mecânicas do aço implementadas no processo de otimização são, tensão de escoamento de 321 MPa, tensão última de 511 MPa e uma deformação unitária de 22,38%. Enquanto para representar os elementos vazios é usado um módulo de elasticidade de $0,01^3$ MPa e um coeficiente de Poisson de 0,3. Estes dois

últimos valores são escolhidos tomando como referência o trabalho realizado por Zou e Xie, 2015.

Para implementar outro tipo de aço no processo de otimização, é necessário ter os valores de plasticidade e substituí-los na seção do código dedicada à geração do material no *software* de elementos finitos. Para os fins deste trabalho, o aço convencional foi implementado, entretanto, a utilização de aços de baixo ponto de escoamento vem ganhando cada vez mais popularidade, pois está comprovado que dispositivos gerados com este tipo de aço apresentam melhor desempenho [Abebe et al., 2013].

4.1.1.3 Condições de Contorno

As condições de contorno são determinadas levando em consideração as condições de operação do dispositivo e o modo de instalação na estrutura. As condições de contorno em que o dispositivo opera são as mesmas aplicadas em estudos anteriores sobre este tipo de dissipador [Abebe et al., 2015; Utomo et al., 2017] e apresentadas na Figura 4.5.

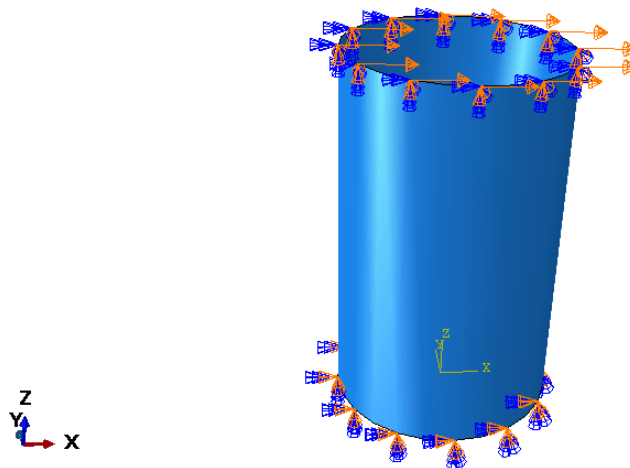


Figura 4.5 - Condições de contorno

As condições de contorno em que o dispositivo opera são: restrição de todos os graus de liberdade na parte inferior, e na parte superior do dispositivo é permitido apenas um grau de

liberdade que corresponde à direção da carga aplicada, a qual, para o estudo realizado, é aplicada na direção do eixo X.

4.1.1.4 Massa do Dispositivo

Para a geração das ranhuras e a seleção da quantidade de material retirado, o dispositivo foi considerado como uma placa plana com sua respectiva malha. Levando-se em consideração as condições de simetria estabelecidas para o dispositivo, que serão apresentadas em uma próxima seção, a área total foi dividida em 8 seções conforme está apresentado na Figura 4.6.

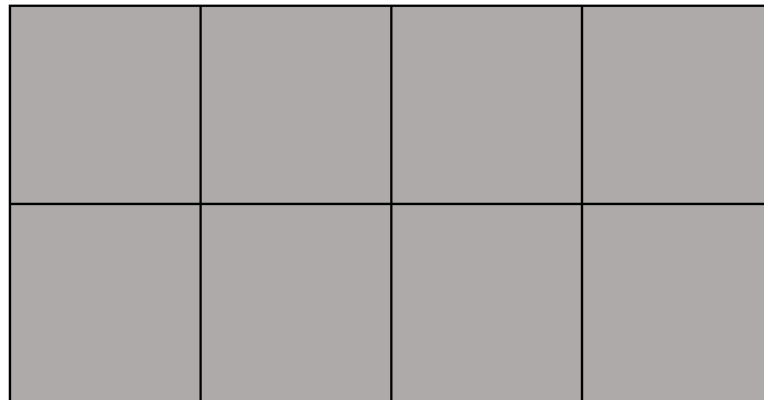


Figura 4.6 – Representação do dissipador como uma placa plana

Posteriormente, foi selecionado um conjunto de elementos que projetariam círculos com diâmetro aproximado de 20 mm. Quatro círculos foram feitos em cada seção para um total de 32 representações circulares em todo o dispositivo, conforme mostrado na Figura 4.7.

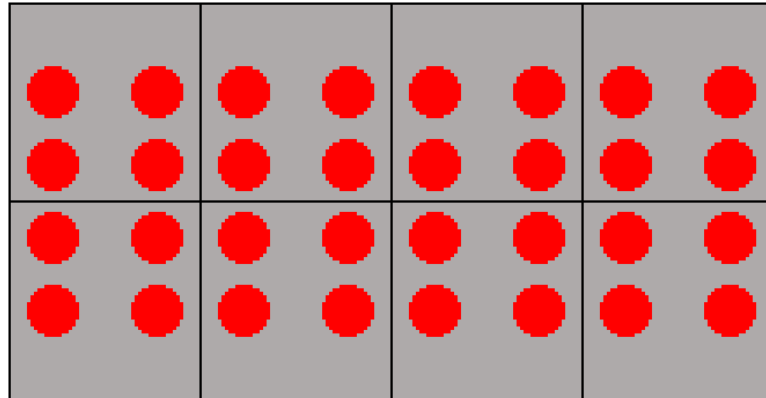


Figura 4.7 – Distribuição de ranhuras circulares no dissipador

Por fim, foi estabelecida a quantidade de elementos que foram utilizados para criar os círculos no dispositivo, no total 5.664 elementos foram utilizados para esta finalidade, este valor representa 22,6% do total de elementos da malha de elementos finitos.

No processo de otimização, as áreas ranhuradas são representadas por elementos atribuídos com o material “vazio”. Conforme o processo avança, a atribuição do material aos elementos varia, portanto, é necessário garantir que a quantidade de elementos que mudam de um material para outro permaneça constante e desta forma a massa do dispositivo não varie.

Os demais tipos de ranhuras foram criados garantindo a utilização da mesma quantidade de elementos, isso com o objetivo de garantir a mesma quantidade de massa em cada um dos modelos iniciais e fazer uma comparação justa de cada uma das configurações. A Figura 4.8 apresenta uma comparação entre o formato do dissipador original e os modelos com ranhuras circulares e quadradas.

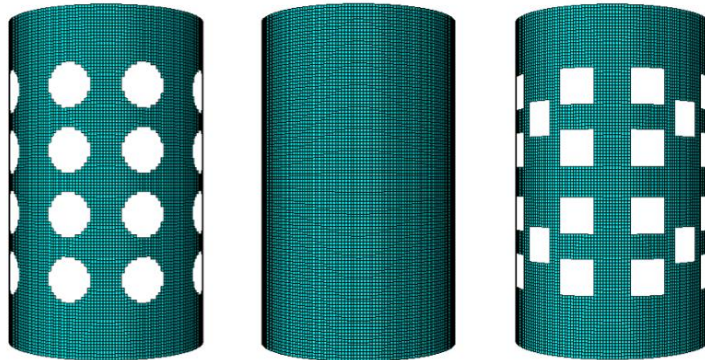


Figura 4.8 - Dissipador original e modelos com ranhuras circular e quadradas

O modelo original tem uma massa de 1,94 kg, enquanto os modelos ranhurados têm uma massa de 1,5 kg.

4.1.2 Variáveis de Projeto

A principal variável de projeto neste processo de otimização é a atribuição de material aos elementos do modelo. O método utilizado para o processo de otimização e principalmente para o tratamento dos elementos é conhecido como *soft kill* [Zou e Xie, 2015]. Esta técnica consiste na utilização de dois tipos de materiais no modelo, um dos quais é o material principal com o qual o dispositivo é feito e o outro é um material com propriedades mecânicas significativamente baixas que representa a área vazia. A técnica oposta ao *soft kill* é o chamado *hard kill* que consiste em eliminar os elementos que não terão material.

No método utilizado para este trabalho, todos os elementos da malha serão utilizados, mas uma porcentagem dos elementos será atribuída a um material fraco ou com propriedades significativamente menores e o restante ao material principal do dispositivo. Este método tem a vantagem de que a malha de elementos finitos não muda a cada iteração, há apenas uma mudança no material de alguns elementos.

Para realizar a atribuição do material no *software* Abaqus, é necessário identificar os elementos com determinado material dentro da malha de elementos finitos, para isso, é criada

uma representação numérica do dispositivo, de forma que possa ser interpretado pelo *software* de elementos finitos. Para o efeito, foi criada uma matriz da mesma dimensão da malha de elementos finitos, nesta matriz apenas são permitidos dois valores numéricos, 0 ou 1, onde o valor 0 representa um elemento vazio e 1 um elemento com material.

A Figura 4.9 apresenta um modelo de dissipador SSD e sua representação mediante uma matriz numérica.

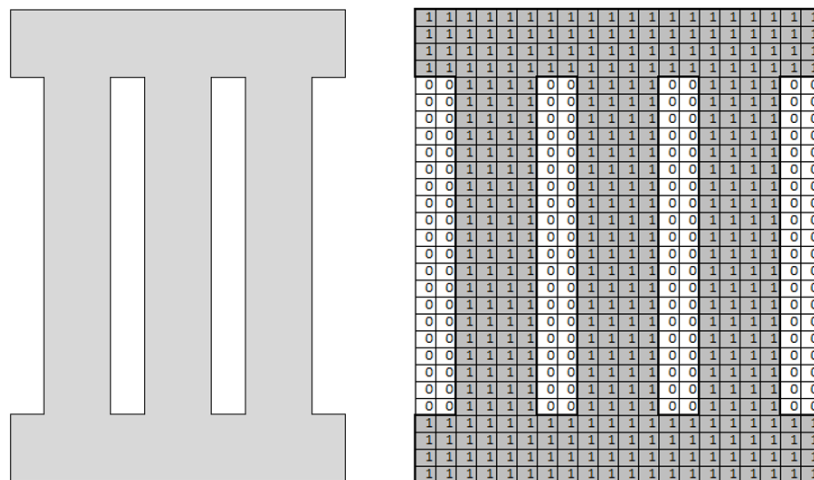


Figura 4.9 - Modelo de dissipador e representação por matriz numérica

4.1.3 Função Objetivo

Para a otimização realizada neste estudo, busca-se aumentar a capacidade de dissipação de energia, produto da deformação plástica do material, conforme apresentado na seção 2.4.8, a dissipação energia é expressa pela Equação 2.5.

$$E_p = \oint F * du . \quad (2.5)$$

Para aumentar a dissipação de energia, é necessário fazer um uso eficiente do material, o que significa uma distribuição uniforme dos esforços no dispositivo.

4.1.4 Restrições

As restrições neste processo de otimização visam manter áreas do dispositivo que não desejam ser removidas, isto com o objetivo de gerar uma geometria que seja fácil de fabricar, garantindo as áreas que ficarão sujeitas a elementos estruturais ou evitando geometrias indesejáveis do dispositivo.

As restrições aplicadas no processo de otimização desenvolvido neste trabalho atendem ao objetivo de evitar a retirada do material nos extremos do dispositivo, pois é nessas áreas que são feitas as conexões necessárias para a instalação com os membros estruturais.

Levando em consideração que na metodologia proposta o dispositivo é representado por uma matriz que contém valores de zero e um e lembrando que o valor de 1 representa o material principal do dispositivo e o valor de 0 representa uma parte vazia do dissipador, as restrições são estabelecidas para evitar a retirada de material das áreas onde os elementos adicionais serão conectados para sua operação.

As restrições são apresentadas na matriz numérica conforme mostrado a seguir.

$$g_1 = M_{i,j}(i = 0 : 14) = 1 \quad (4.1)$$

$$g_2 = M_{i,j}(i = -1 : -15) = 1 \quad (4.2)$$

Onde $M_{i,j}$ representa o valor do material do elemento da linha i e a coluna j da matriz, isso significa que tanto nas primeiras 15 linhas quanto nas últimas 15 linhas da matriz que representa o dispositivo, não haverá modificação do material e nesta área sempre conterà o material principal do dispositivo.

4.1.5 Equacionamento do Problema de Otimização

Assim, conforme exposto nas seção anteriores, o problema de otimização proposto neste trabalho pode ser escrito da seguinte forma

Encontrar:

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$$

Que maximiza:

$$E_p = \oint F * du \quad (4.3)$$

Submetido à:

$$g_1 = M_{i,j}(i = 0 : 14) = 1$$

$$g_2 = M_{i,j}(i = -1 : -15) = 1$$

O qual pode ser resolvido utilizando o *Simulated Annealing*.

4.2 Simulated Annealing

O SA é um algoritmo de busca baseado em trajeto e requer apenas dois indivíduos para realizar a comparação da função objetivo.

O fator que simula a diminuição da temperatura do processo de recozimento é o parâmetro de controle, este valor diminui conforme o processo de otimização avança. Neste estudo, o parâmetro de controle varia de 1 a 0,01.

A taxa de resfriamento é um valor numérico que é responsável por diminuir o parâmetro de controle a cada iteração, neste caso, a taxa de resfriamento tem o valor de 0,75, a taxa de resfriamento é utilizada até que o parâmetro de controle alcance seu valor limite.

4.3 Heurísticas de Modificação

As heurísticas são expressões utilizadas para contribuir na busca pela solução do processo de otimização. No processo de otimização proposto neste trabalho, as heurísticas correspondem a um conjunto de regras que avaliam o estado de tensão de cada um dos elementos e dependendo de seu estado, a probabilidade de modificação do material dos elementos é avaliada.

Para melhorar a capacidade de dissipação de energia do dispositivo, é necessário utilizar todo o material disponível, para isso é necessário avaliar cada um dos elementos e seus respectivos materiais.

Como foi mencionado anteriormente, a distribuição do material é representada por um arranjo numérico que contém os valores 0 e 1. A configuração inicial do dispositivo é introduzida no software de elementos finitos através do arranjo matricial.

Usando as listas, os elementos que devem ter determinado material são agrupados para a posterior atribuição, uma vez feita a atribuição do material é realizada a análise dos elementos finitos para obter o comportamento apresentado pelo dispositivo e extrair as variáveis necessárias para os próximos passos do processo de otimização.

As heurísticas de mudança utilizam os valores de tensão em cada um dos elementos. O primeiro passo é determinar a relação de tensão de cada elemento, esta é uma quantidade que relaciona a tensão no elemento e a tensão máxima alcançada no dissipador conforme mostra a Equação 4.3.

$$P_{S_{ij}} = \frac{S_{ij}}{S_{max}} \quad (4.3)$$

onde

$P_{S_{ij}}$: relação de tensão do elemento ij ;

S_{ij} : esforço no elemento ij ;

S_{max} : esforço máximo no dissipador.

A primeira etapa no uso de heurísticas de mudança é identificar a razão de tensões de cada um dos elementos, se o elemento tem um valor de 1 na matriz, cada valor de razão de tensões é comparado com um valor aleatório (ou fixo) gerado, se o valor aleatório obtido é maior que a razão de tensões no material, este elemento terá o valor 0 na matriz durante a análise seguinte.

Depois de realizar o processo de mudança dos elementos de 1 a 0, um processo semelhante é realizado com os elementos que têm o valor 0. Para determinar a prioridade de mudança de cada um desses elementos, utiliza-se a Equação 4.4, esta expressão avalia a mudança de probabilidade de um elemento de 0 para 1 ($P01_{ij}$) pela análise dos valores de tensão dos elementos ao redor do elemento analisado.

$$P01_{ij} = \frac{S_{(i-,j)}}{S_{max}} + \frac{S_{(i+1-j)}}{S_{max}} + \frac{S_{(i,j+1)}}{S_{max}} + \frac{S_{(i,j-1)}}{S_{max}} \quad (4.4)$$

Esta expressão avalia o estado de tensão dos elementos localizados acima, abaixo, à direita e à esquerda, respectivamente, do elemento analisado.

Para cada um dos elementos da matriz que possuem valor 0, são avaliados os valores de tensão dos elementos ao redor dele, anteriormente foi criado um valor de probabilidade para os elementos que possuíam valor 1 na matriz que representa o dispositivo, cada um desses valores foi armazenado em outra matriz chamada matriz de probabilidade, esta matriz contém a relação entre a tensão dos elementos e a tensão máxima no dispositivo (valores de 0 para os elementos sem material e valores entre 0 e 1 para elementos com material). Para a posição do elemento a ser analisado, são avaliados os valores da matriz de probabilidade dos elementos que estão ao redor, esses valores são somados e mediados, logo, os valores e a posição do elemento analisado são armazenado em outra matriz. Por fim, as posições que obtiveram os

maiores valores são modificadas de 0 para 1 na matriz do material levando em consideração que são o mesmo número de elementos que foram alterados de 1 para 0.

Durante o processo de realocação do material, podem surgir situações que geram geometrias indesejadas, que podem causar problemas de convergência na análise dos elementos finitos, ineficiência do dispositivo ou mau uso do material, para evitar essas situações é necessário inspecionar a localização dos elementos que contêm material.

Uma destas situações ocorre quando um elemento é conectado ao resto do modelo apenas através de um de seus nós, esta situação é apresentada na Figura 4.10.

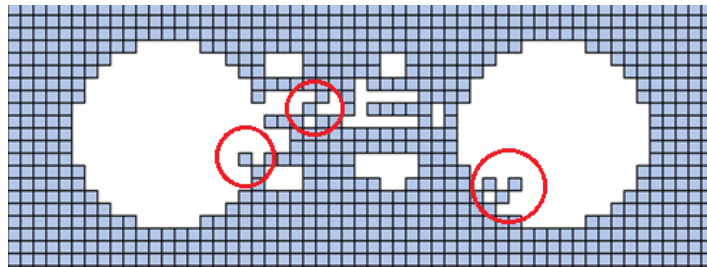


Figura 4.10 – Conexão mediante um único nó

Outro cenário que pode ocorrer é quando uma zona de material é isolada do resto do modelo criando ilhas de material distribuídas pelo dissipador, conforme mostrado na Figura 4.11.

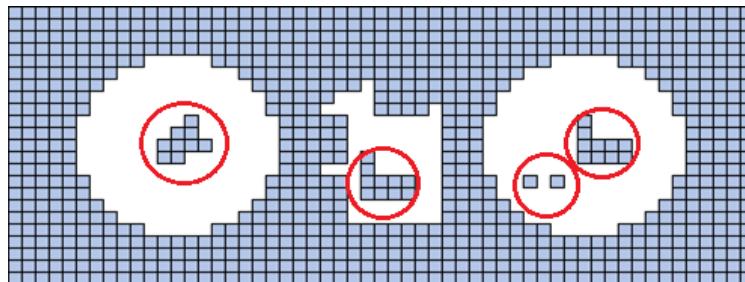


Figura 4.11 – Áreas isoladas de material

Para evitar essas situações, após a realocação dos elementos, a conectividade de cada um dos elementos com o material é avaliada por meio da Equação 4.5

$$(M_{(i-1,j)} + M_{(i+1,j)} + M_{(i,j+1)} + M_{(i,j-1)}) > 2 \quad (4.5)$$

Esta expressão garante que o elemento está ligado a pelo menos outros dois elementos, caso esta relação não seja cumprida, o referido elemento será alterado por um dos restantes elementos da matriz probabilidade de alteração de 0 a 1. Esta operação é realizada em duas ocasiões para reavaliar a condição dos elementos recentemente alterados.

As heurísticas não são aplicadas apenas para alterar o valor dos elementos, essas regras também são utilizadas para estabelecer a aparência do modelo. Neste caso uma outra heurística foi utilizada para garantir a simetria no dispositivo.

Para o dispositivo estudado é escolhida a simetria do quarto do diâmetro do dissipador, ou seja, cada quarto do dispositivo será um reflexo de seu vizinho e a simetria média ao longo do comprimento do dispositivo é apresentada na Figura 4.12.

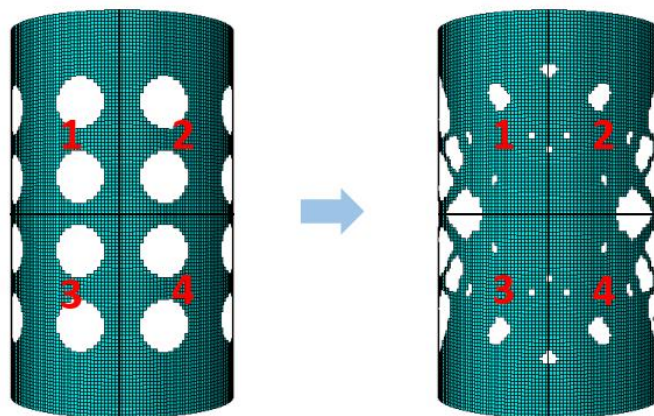


Figura 4.12 – Simetria do dissipador cilíndrico

Dessa forma, as atividades de avaliação e realocação dos elementos são aplicadas a um oitavo do dissipador e implementadas no restante. Assim, é gerado um dispositivo mais fácil de fabricar e o tempo computacional é reduzido.

4.4 Descrição do Código de Otimização Desenvolvido

O código utilizado para o processo de otimização foi criado na linguagem de programação Python, o script contém as instruções que serão executadas no *software* de elementos finitos Abaqus. Uma breve descrição do código desenvolvido nesta dissertação é apresentada a seguir.

4.4.1 Importação dos Módulos

Primeiro, os módulos da linguagem de programação Python são importados, bem como os do *software* de elementos finitos Abaqus.

4.4.2 Arranjos Numéricos Necessários

A primeira variável consiste em uma lista contendo o número correspondente aos elementos vazios do modelo, posteriormente duas matrizes do tamanho da malha de elementos finitos são criadas, a primeira matriz é a matriz dos elementos, que é uma réplica da distribuição de elementos na malha de elementos finitos, a segunda matriz é uma matriz que contém só valor de 1 e é chamada matriz de material e contém as mesmas dimensões da matriz anterior.

Os elementos da lista são comparados com os valores da matriz de elementos, ao percorrer a referida matriz, quando o valor de uma determinada posição coincide com o valor de um elemento da lista vazia, nessa posição o valor de 1 será ser alterado para 0 na matriz do material, desta forma é obtida a configuração inicial que será utilizada na análise de elementos finitos.

4.4.3 Criação das Funções para o Algoritmo de Otimização e Heurísticas

Duas funções foram criadas, a primeira corresponde à função de SA onde são inseridos a energia dos dispositivos a serem comparados, a matriz de configuração, a matriz de tensões e o valor correspondente ao parâmetro de controle do algoritmo. Uma vez executada a função, o algoritmo entrega as propriedades correspondentes à matriz selecionada, que serão submetidas ao processo de realocação dos elementos.

A próxima função é a função de modificação de matriz, esta função utiliza a matriz de configuração selecionada e sua matriz de tensões, avalia as tensões nos elementos e aplica as heurísticas de mudança correspondentes. Ao final, é entregue a nova matriz de configuração gerada.

Após as funções é realizado o processo de criação do modelo e sua respectiva análise, nesta parte do trabalho é apresentada uma breve descrição dos procedimentos utilizados em cada seção do *software* de elementos finitos Abaqus.

4.4.4 Criação de Dispositivo

A criação do modelo do dissipador é desenvolvida no módulo *Part*, nesta seção é criada a geometria do modelo a ser analisado, suas propriedades geométricas como altura, diâmetro e espessura são estabelecidas e a representação a ser utilizada é definida, seja *Solid* ou tipo de *Shell*, neste trabalho o tipo de *Shell* é usado.

4.4.5 Criação de Materiais e Atribuição

Na seção de materiais do *software* de elementos finitos, são introduzidas as propriedades mecânicas de cada um dos materiais, levando em consideração que o material principal corresponde ao aço e o segundo material corresponde ao material dos elementos vazios, que possui características muito inferiores ao material principal. Inicialmente todo o dispositivo é atribuído com o material principal e posteriormente é modificado uma vez que a malha de elementos finitos é criada.

4.4.6 Seleção do Tipo de Análise e Solicitação das Variáveis de Interesse

Na seção *Step* é especificado o tipo de análise a ser realizada, seja uma análise dinâmica, uma análise estática, uma análise de tempo de deslocamento entre outras, neste estudo foi selecionada uma análise estática geral com um período de 4 segundos. É importante lembrar que neste tipo de análise e no comportamento do dispositivo, o fator tempo não tem um impacto significativo, portanto é possível selecionar outro valor para o período de movimentação, levando em consideração que os deslocamentos correspondentes devem ser adaptados para isso.

As variáveis solicitadas ao *software* de elementos finitos correspondem à energia dissipada em decorrência da deformação plástica, às tensões ao longo do dispositivo e os deslocamentos e reações na direção da carga.

4.4.7 Atribuição de Condições de Limite e Aplicação de Carga

As condições de operação do dissipador são apresentadas na seção *Load* do *software* Abaqus, na qual são implementadas as restrições de movimentação do dispositivo, bem como a distribuição dos deslocamentos ao longo do período de análise. As condições de contorno utilizadas foram mencionadas na seção 4.1.13, por outro lado, o protocolo de carregamento consiste em 4 movimentos partindo da condição de repouso, em seguida, movendo-se 10 mm para a direita e depois na direção oposta até obter a mesma amplitude e finalmente, o dispositivo retorna à sua posição inicial. Este protocolo foi usado por outros autores para processos semelhantes [Ghabraie, 2010; Ferrer, 2017]. A Figura 4.13 apresenta o protocolo de carregamento fornecido ao dispositivo.

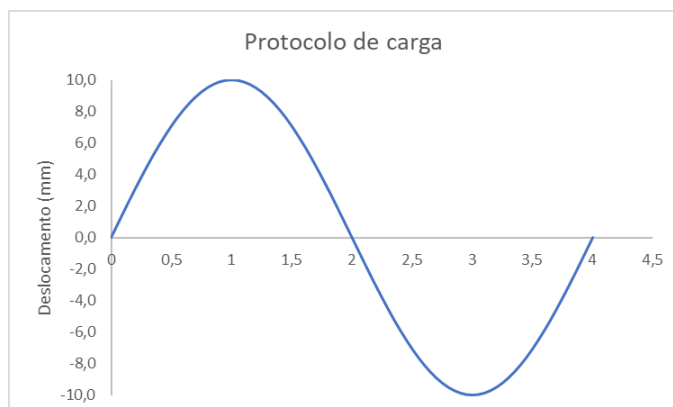


Figura 4.13 – Protocolo de carregamento

4.4.8 Geração de Malha

A malha de elementos finitos é criada no módulo *Mesh*. Neste módulo, o tamanho dos elementos e o tipo de elemento selecionado são determinados. Nesta seção também podem ser criadas seções se for necessário conhecer determinado comportamento em uma área específica do modelo, nesta parte do processo foi utilizado o elemento S4R com tamanho de 1,4 mm, este tipo de elemento foi selecionado com base nas recomendações de outros autores, nas características geométricas do dispositivo e os recursos computacionais disponíveis. O modelo tem um total de 25.080 elementos, dos quais 5.664 pertencem a áreas vazias.

Uma vez criada a malha de elementos finitos, os elementos da malha são percorridos e o rótulo (*label*) de cada um deles é relacionado às posições da matriz de configuração por meio de um contador, o contador aumenta à medida que a matriz é percorrida.

Duas listas são criadas para armazenar os valores do contador que correspondem aos elementos vazios ou com material, quando o valor da matriz é zero o respectivo valor do contador é armazenado na lista vazia e da mesma forma quando a posição percorrida tem o valor 1. O valor do contador representa o rótulo do elemento na malha de elementos finitos.

A atribuição de material a cada um dos elementos utiliza cada uma das listas geradas, dependendo da lista em que os números dos elementos estão agrupados, a atribuição de material

é realizada, em cada uma das iterações os elementos das matrizes são apagados para a próxima atribuição de configuração.

4.4.9 Executar a Análise e Extrair os Resultados

No módulo *Job* do Abaqus é executada a análise de elementos finitos gerada anteriormente. Nesta seção é possível realizar uma inspeção dos dados fornecidos para evitar erros durante a execução, uma vez realizada a análise, deve-se aguardar até que esta análise seja finalizada para continuar com a aplicação do algoritmo de otimização e apenas as alterações correspondentes para uma análise futura.

4.4.10 Leitura de Resultados e Geração de Novos Modelos de Dispositivos

Ao final da análise dos elementos finitos, são extraídos os valores da energia dissipada do modelo e das tensões nos elementos, no caso de ser a primeira iteração, apenas a função de modificação da matriz é executada e caso contrário o SA é executado para determinar qual configuração deve ser selecionada para posterior modificação, uma nova configuração é criada e o processo é repetido a partir da atribuição do material.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho, o modelo otimizado do dissipador de energia metálico cilíndrico vazado ranhurado foi obtido a partir de 5 configurações iniciais com diferentes tipos de ranhuras, conforme mostrado na Figura 5.1.

Dispositivos deste tipo já foram analisados por outros autores, no entanto, todas as referências bibliográficas utilizam dissipadores cilíndrico sólidos em seus trabalhos, por isso neste estudo a análise da capacidade de dissipação de um dissipador cilíndrico com ranhuras é proposta para determinar se as ranhuras poderiam contribuir para obter um dispositivo com melhor relação dissipação de energia - massa.

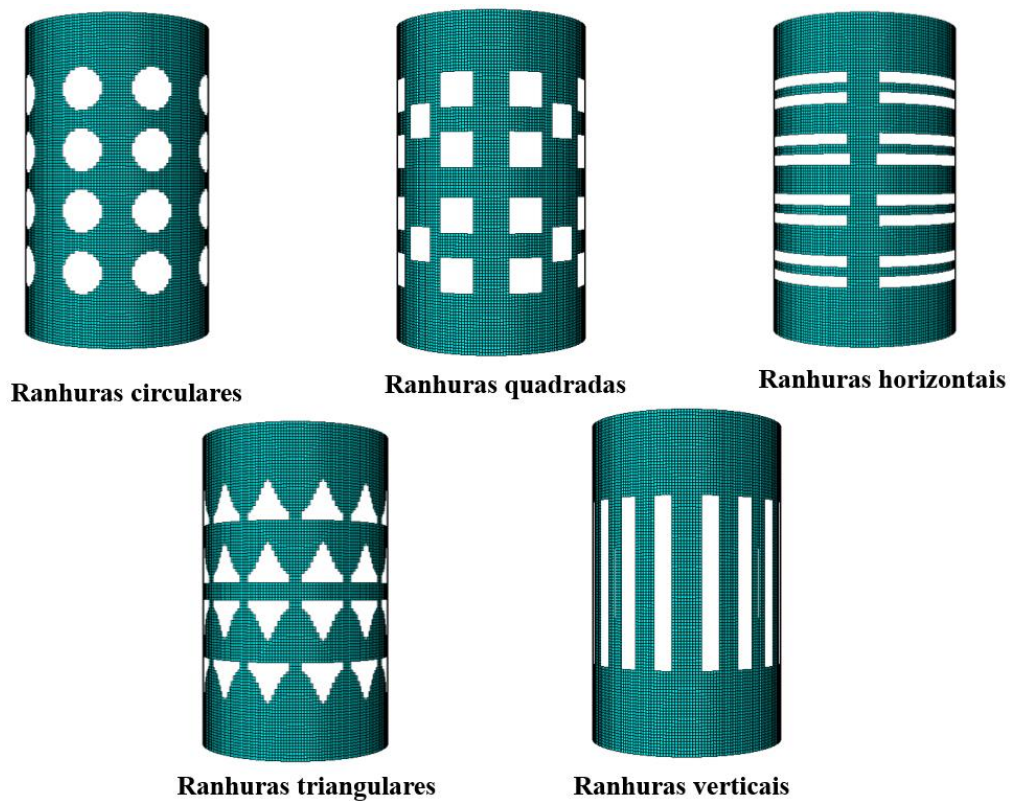


Figura 5.1- Modelos iniciais

A utilização das ranhuras permite avaliar a possibilidade de obtenção de um dispositivo que aproveite melhor o material disponível, da mesma forma, busca identificar se para o dissipador metálico cilíndrico ranhurado existe uma configuração inicial que facilite o processo de otimização e contribua para obter o modelo otimizado com melhor desempenho.

O processo de otimização foi executado três vezes para cada configuração inicial, isto foi realizado levando em consideração a natureza estocástica do algoritmo *Simulated Annealing* e o efeito do uso de valores aleatórios tanto nas heurísticas de mudança quanto no algoritmo de otimização. Adicionalmente, com base em testes realizados anteriormente, foi determinado que o uso de 50 iterações no processo de otimização é uma quantidade adequada para permitir o processo de convergência do algoritmo, porém uma quantidade maior pode ser utilizada para tentar obter melhores resultados, mas é importante considerar que cada iteração levou cerca de 1,5 horas para ser analisada e no total cada execução do processo de otimização levou cerca de 1,5 dias, isso somado às 3 repetições realizadas para cada um dos modelos, resulta em um total de 4,5 dias para terminar o processo com cada uma das 5 configurações iniciais. Assim, levando em conta o que foi citado acima, para implementar mais iterações no processo deve-se ter em mente o elevado custo computacional que esta ação representa.

5.1 Conceitos Usados na Apresentação dos Resultados

Antes de iniciar a apresentação dos resultados, é necessário apresentar algumas definições utilizadas na análise dos modelos otimizados.

5.1.1 Apresentação dos Modelos Otimizados

Devido à forma cilíndrica do dispositivo analisado, às condições de simetria e ao comportamento apresentado pelo processo de otimização, faz-se necessária a utilização de duas imagens para apresentar a forma obtida dos modelos otimizados, uma das imagens é denominada vista frontal ou simplesmente frontal e outra é denominada vista lateral ou lateral.

A vista frontal refere-se à visualização do dispositivo no plano ZX, enquanto a vista lateral refere-se à visualização do dispositivo no plano ZY, conforme mostrado na Figura 5.2.

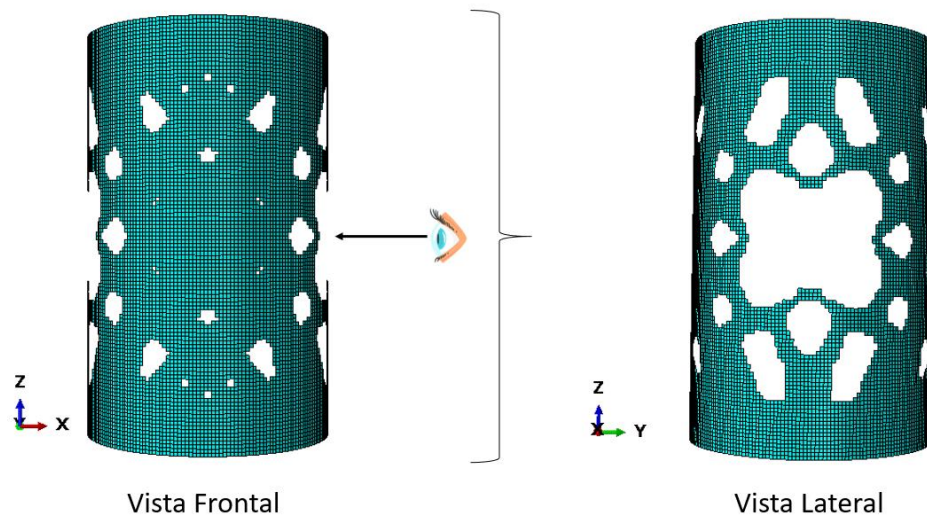


Figura 5.2 - Representação da forma de visualização dos dispositivos otimizados

5.1.2 Nomenclatura dos Modelos Otimizados

Para identificar cada um dos modelos otimizados gerados em cada uma das execuções do processo de otimização, uma nomenclatura foi adotada para este fim. Os modelos iniciais serão nomeados de acordo com a ranhura correspondente a cada um deles, o nome dos dispositivos otimizados será uma sigla de duas letras e um número onde a primeira letra corresponde à configuração inicial utilizada para sua criação, a segunda letra é igual para todos eles, é a letra O, fazendo referência que se trata de um modelo otimizado e o número refere-se à execução do processo correspondente, tendo os valores de 1 a 3. Por exemplo, o modelo CO1 é o dispositivo gerado na primeira execução do código de otimização do modelo inicial com ranhuras circulares. A Tabela 5.1 apresenta a nomenclatura usada para se referir aos modelos inicial e otimizado.

Tabela 5.1 – Nomenclatura usada na apresentação dos modelos otimizados

Nomenclatura do Dispositivo			
Modelos Otimizados			
Modelos iniciais	No de Execução do processo		
	1	2	3
Circular	CO1	CO2	CO3
Quadrado	QO1	QO2	QO3
Triangular	TO1	TO2	TO3
Horizontal	HO1	HO2	HO3
Vertical	VO1	VO2	VO3

5.2 Capacidade de Dissipação de Energia e Evolução do Processo de Otimização

A Tabela 5.2 apresenta os resultados da dissipação de energia obtidos para cada um dos modelos analisados em cada uma das execuções desenvolvidas, pode-se observar que o modelo vertical apresenta pior capacidade de dissipação de energia entre os modelos iniciais, porém, o modelo VO3 apresentou o melhor desempenho entre os modelos otimizados, além disso, é interessante observar que dentre todos os modelos otimizados, o modelo VO2 foi o que apresentou o pior desempenho.

Tabela 5.2 – Dissipação de energia em cada execução do processo de otimização

Tipo de ranhuras	Dissipação de energia (J)			
	Inicial	Execução do processo de otimização		
		1	2	3
Circular	2527	4810	4704	4814
Quadrado	2149	4580	4660	4588
Triangular	1731	4966	4950	5179
Horizontal	737	4415	4324	4256
Vertical	540	5360	3590	<u>5573</u>

O fato de que dois dos modelos otimizados gerados a partir da mesma configuração inicial têm a melhor e a pior capacidade de dissipação de energia ocorre devido ao uso de probabilidades no algoritmo e nas heurísticas de mudança, o que faz com que o processo de otimização tome caminhos diferentes em cada um dos processos e obter resultados muito distintos, daí a necessidade de executar o código mais de uma vez.

No caso dos modelos VO2 e VO3 gerados a partir do modelo vertical isso ocorre principalmente devido ao alto número de elementos que experimentaram baixos valores de tensão após a primeira análise de elementos finitos como pode ser visto na Figura 5.3

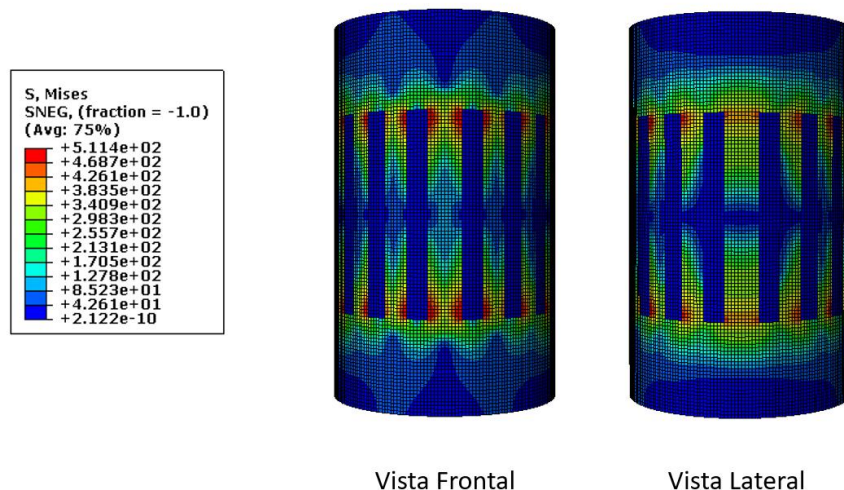


Figura 5. 3 – Distribuição de tensões no modelo vertical

Devido ao uso de probabilidades nas heurísticas de mudança, observou-se que para esta configuração o procedimento desenvolveu duas alternativas, na primeira os elementos vazios se concentraram na parte lateral e se distribuíram por aquela área enquanto na segunda alternativa, os elementos vazios localizaram-se principalmente ao longo da altura do dispositivo nesta mesma região, como pode ser visto na Figura 5.4.

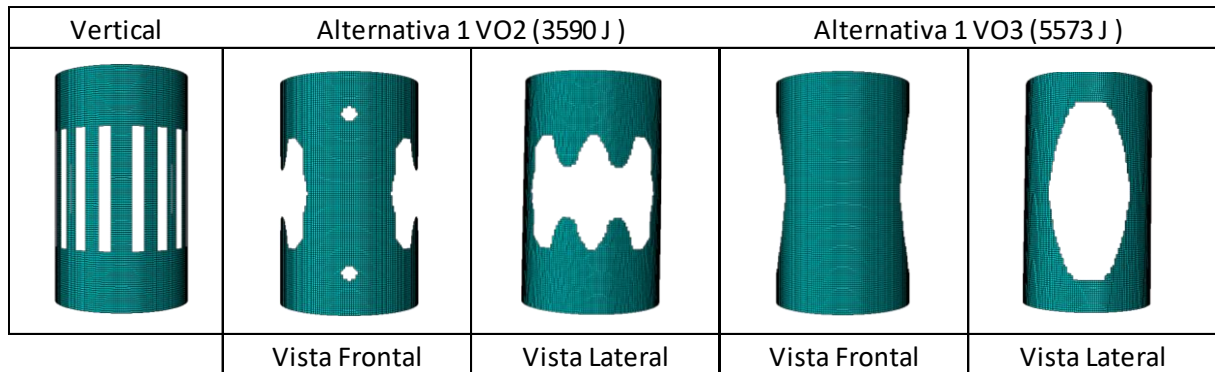


Figura 5.4 – Configurações otimizadas no processo otimização do dissipador de ranhuras verticais.

Devido a essas situações, é importante realizar o processo de otimização mais de uma vez e garantir que o melhor resultado possível esteja sendo obtido em cada um dos modelos.

Continuando com a análise da dissipação de energia dos modelos propostos, o dissipador que apresentou a menor capacidade de dissipação de energia foi o modelo HO1 obtendo uma dissipação máxima de energia de 4415 J.

A Figura 5.5 apresenta a comparação entre o formato das configurações inicial e otimizada de cada um dos modelos de dissipadores analisados. Na primeira coluna localizam-se as configurações iniciais com suas respectivas capacidades de dissipação, posteriormente a vista frontal e lateral do melhor modelo otimizado de cada uma das configurações, com sua nomenclatura assignada e sua capacidade de dissipação, finalmente, na última coluna, apresenta-se o aumento da capacidade de dissipação de energia do modelo otimizado em relação à sua configuração inicial.

Do dissipador VO3 pode-se perceber que para atingir a configuração que permite maior dissipação de energia, as áreas vazias de material devem ser totalmente deslocadas para a lateral do dispositivo, este processo pode demorar dependendo a distribuição dos esforços nos dispositivos, levando em consideração que a variação do material é realizada de acordo com os valores dos esforços nos elementos, dependendo da configuração inicial, podem ocorrer diferentes focos de esforços que influenciam a modificação do material.






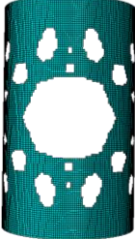

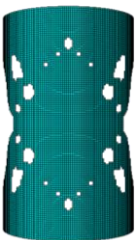


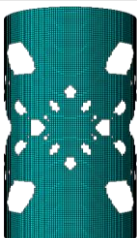




Modelo Inicial	Modelo Otimizado Vista Frontal	Modelo Otimizado Vista Lateral	Incremento
 2527 J	 4847 J	 4847 J	91,80%
 2149 J	 4660 J	 4660 J	116,84%
 1731 J	 5179 J	 5179 J	202,33%
 737 J	 4415 J	 4415 J	499%
 540 J	 5573 J	 5573 J	932%

Figura 5.5 - Comparação da forma do dispositivo inicial e do dispositivo otimizado

A evolução de cada um dos modelos até a obtenção da configuração que proporciona maior dissipação de energia e a convergência de cada processo de otimização são apresentados nas Figuras 5.6 a 5.15.

Cada imagem da evolução do processo de otimização apresenta o modelo inicial e a evolução da forma até a obtenção dos dispositivos apresentados na Figura 5.5. Cada coluna apresenta a melhor configuração em um intervalo de dez iterações.

Pode-se observar que através do processo de otimização avançou nas seções finais, a distribuição dos elementos vazios não apresentou diferenças significativas, o que era um comportamento esperado no processo, pois a cada execução da análise de elementos finitos buscava-se ocupar as áreas com menores esforços, que iam diminuindo com o decorrer do processo. As imagens apresentadas fazem parte de cada um dos dispositivos relacionados na Figura 5.5.

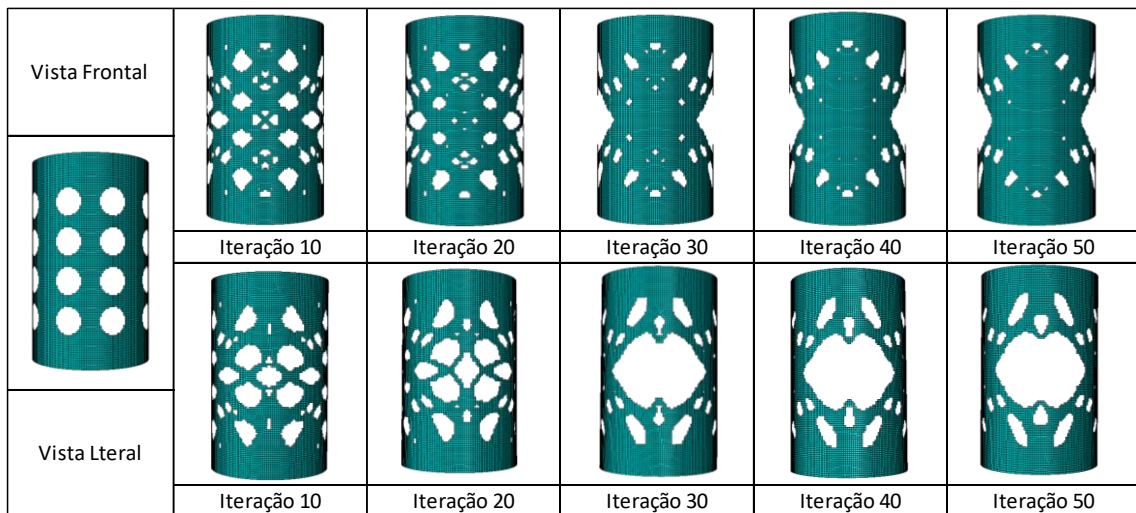


Figura 5.6 – Evolução dissipador com ranhuras circulares

Como mencionado anteriormente, o processo de otimização focou na localização dos elementos vazios nas laterais. Para o caso do modelo circular houve deslocamentos dos elementos vazios em todos os intervalos das execuções, isso é determinado observando-se que

entre as iterações 40 e 50, o dispositivo apresentou pequenas modificações, ou seja, as modificações feitas em cada intervalo contribuíram para a melhoria do dispositivo.

O processo de convergência para cada uma das execuções do dispositivo com ranhuras circulares é apresentado na Figura 5.7. Um comportamento semelhante pode ser observado entre as rodadas do processo de otimização, principalmente entre as rodadas 1 e 3, o melhor resultado foi obtido próximo ao final do processo de otimização.

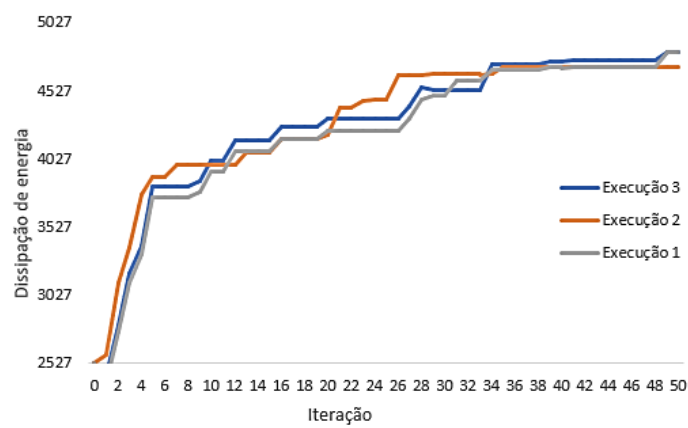


Figura 5.7 – Comportamento do algoritmo de otimização Ranhuras circulares

O modelo de ranhuras quadradas obteve o dispositivo QO2 com 37 iterações do processo, porém, observando a Figura 5.8 é possível perceber que o processo de distribuição dos elementos foi lento, pois o dispositivo teve poucas modificações após as primeiras dez iterações, além disso, há uma quantidade significativa de elementos vazios na parte frontal do dissipador.

Em relação ao processo de convergência, existe um comportamento semelhante das execuções próximas à iteração 40 onde ocorre a convergência.

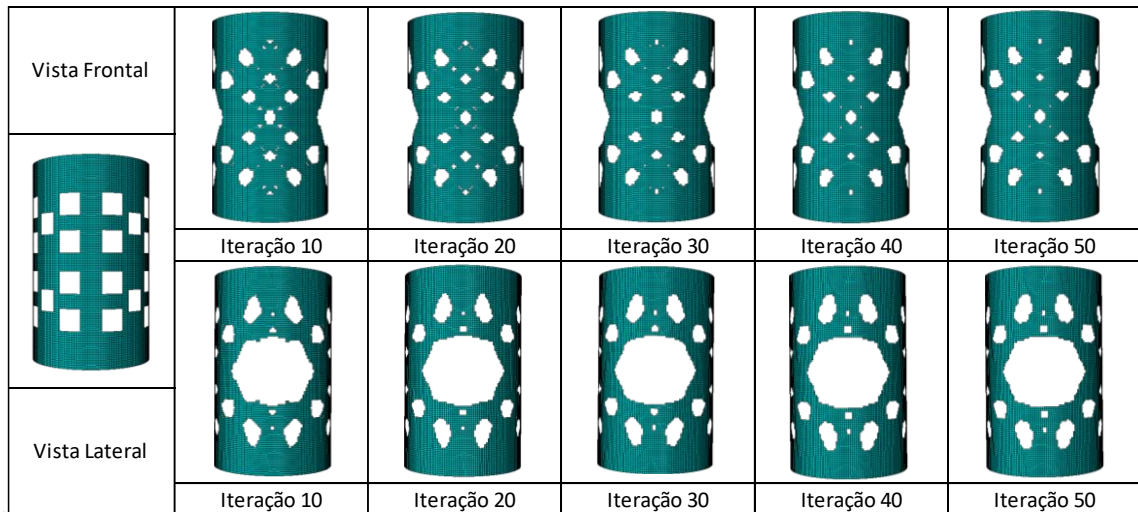


Figura 5.8 – Evolução dissipador com ranhuras quadradas

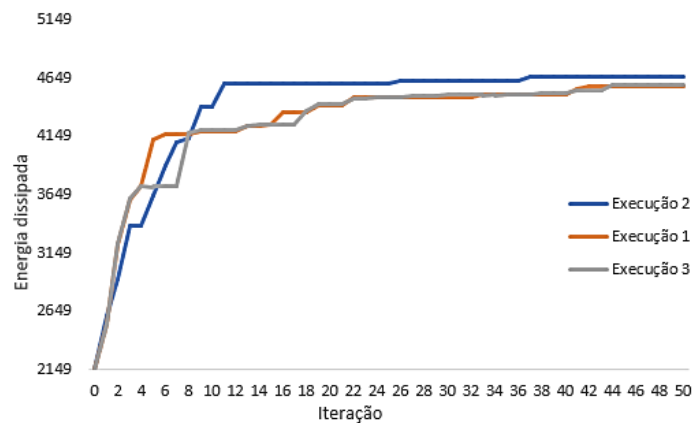


Figura 5.9 – Comportamento do algoritmo de otimização
Ranhuras quadradas

Ao contrário do caso do dispositivo com ranhuras circulares, as configurações quadrada e triangular conseguiram obter o melhor arranjo dos elementos vazios com 40 iterações, ambas as configurações alcançaram seu melhor modelo de dissipador na iteração número 37, porém, o formato de os dois dissipadores otimizados possui características diferentes, o que também se reflete na capacidade de dissipação de energia de cada um.

A Figura 5.10 apresenta o processo de evolução do dispositivo TO3, na qual se pode observar que para obter este modelo foi preciso cerca de 40 iterações. Esta configuração obteve o segundo lugar em capacidade de energia e comparando-a com os modelos CO3 e QO2, esta configuração obtém melhor desempenho ao localizar maior quantidade de elementos vazios ao longo da zona lateral do dispositivo.

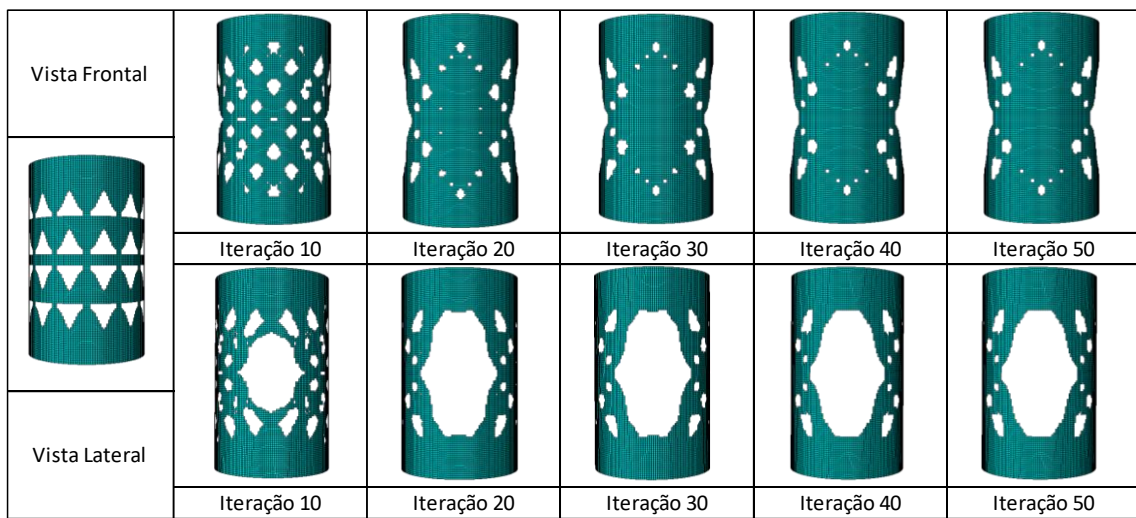


Figura 5.10 – Evolução dissipador com ranhuras triangulares

A Figura 5.11 mostra o comportamento do processo de otimização do dissipador triangular, em que as execuções obtiveram o melhor resultado após 40 iterações e apresentaram valores semelhantes nas 5 primeiras iterações.

O modelo HO1 apresentou menor capacidade de dissipação entre os modelos otimizados. Chama a atenção o conjunto de elementos com material que estavam localizados em uma ampla área de elementos vazios na lateral do dispositivo, embora se saiba que para melhorar a capacidade de dissipação do dissipador essa área deve estar completamente vazia, a localização dos elementos naquela zona não infringe as restrições impostas, uma vez que cada um desses elementos está em contato com pelo menos dois outros elementos.

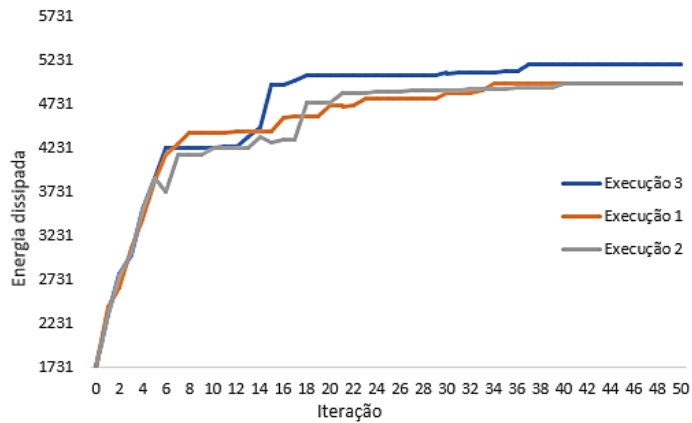


Figura 5.11 – Comportamento do algoritmo de otimização
Ranhuras triangulares

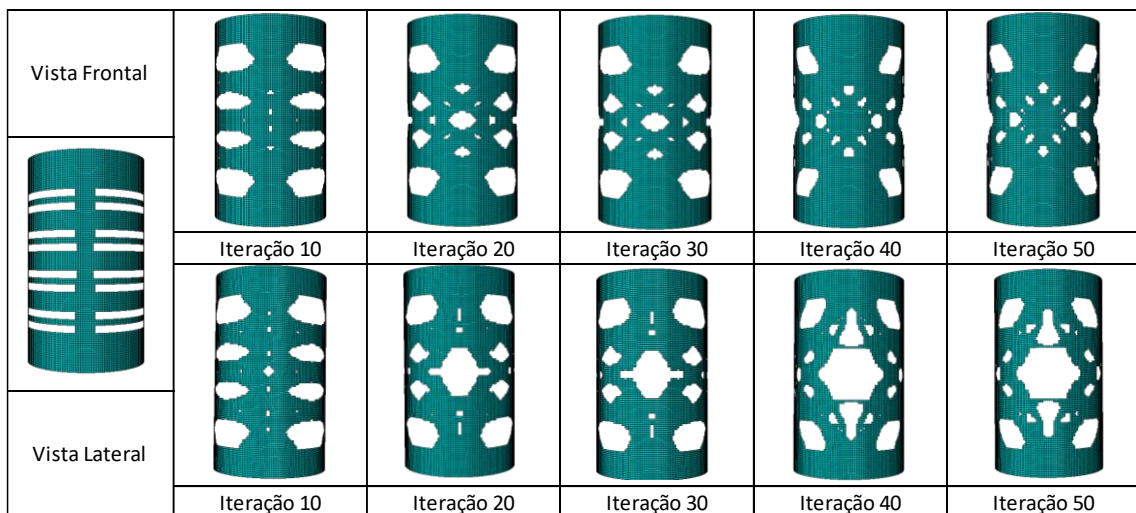


Figura 5.12 – Evolução dissipador com ranhuras horizontais

O comportamento do processo de otimização do dispositivo com ranhuras horizontais foi o que apresentou maior similaridade em quase todas as iterações, após a iteração 32, o processo de otimização não conseguiu encontrar uma nova configuração que proporcionasse melhor dissipação de energia.

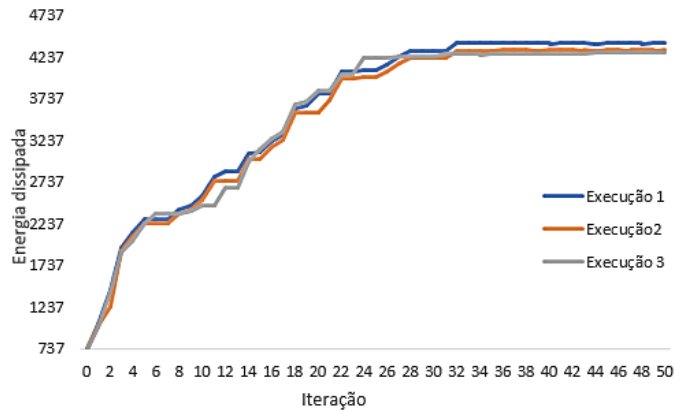


Figura 5.13 – Comportamento do algoritmo de otimização
Ranuras horizontais

O modelo de dissipador com ranhuras verticais gerou o dispositivo VO3 o qual apresentou a maior capacidade de dissipação de energia, utilizando apenas 20 iterações para chegar ao modelo com as melhores características.

Outra característica importante do dispositivo VO3, além de ter a maior capacidade de dissipação de energia, é que ele apresenta a forma mais simples entre todos os modelos otimizados, o que representa uma vantagem na hora de sua fabricação.

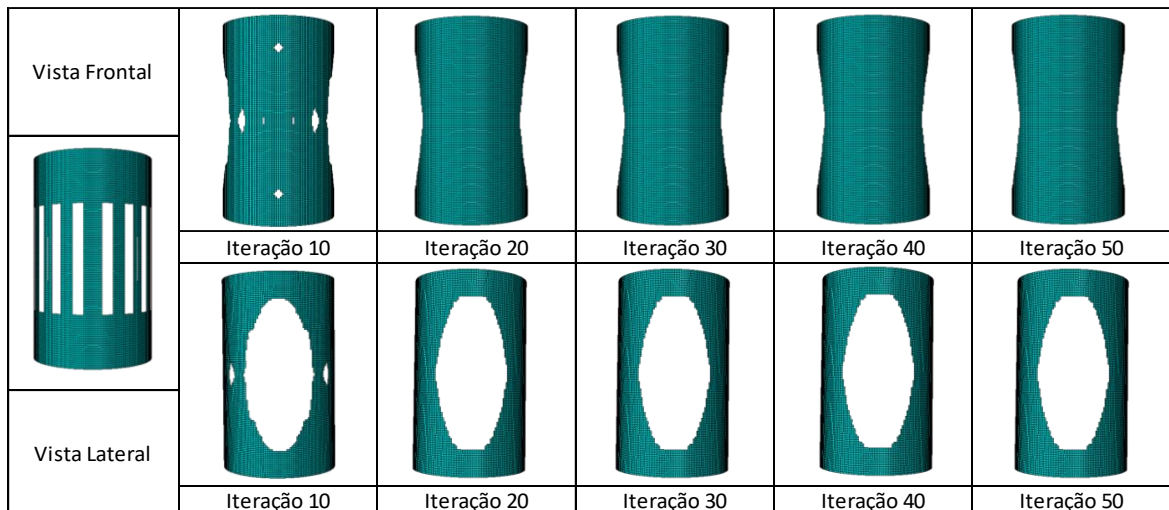


Figura 5.14 – Evolução dissipador com ranhuras verticais

Dentre os modelos analisados, determinou-se que a configuração inicial com ranhuras verticais exigiu menos iterações até chegar ao modelo otimizado final, exigindo cerca de 20 iterações como se apresenta na Figura 5.15, os demais modelos atingiram sua melhor configuração de dissipador após aproximadamente 35 iterações.

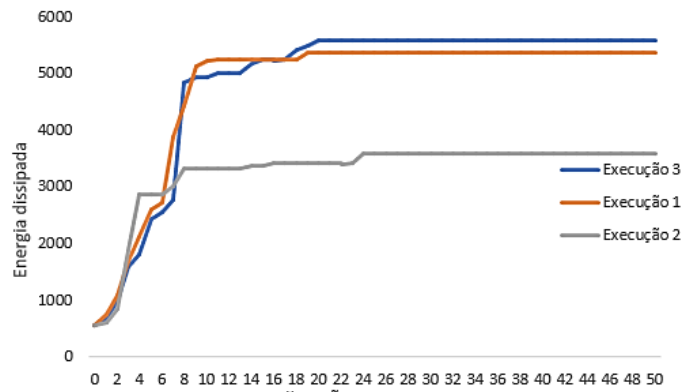


Figura 5.15 – Comportamento do algoritmo de otimização
Ranhuras verticais

As curvas de comportamento do processo de otimização do dispositivo com ranhuras verticais apresentaram formatos semelhantes, mas com diferenças significativas na curva correspondente à segunda execução, embora esta situação já tenha sido explicada anteriormente, a Figura 5.15 permite uma melhor apreciação dessa diferença.

5.1 Distribuições de Tensões

O processo de otimização implementado modifica a configuração inicial do modelo de dissipador analisado, redistribuindo as áreas sem material com base na tensão experimentada pelos elementos da malha de elementos finitos quando submetidos a um protocolo de carga específico. O objetivo é aproveitar o material disponível de tal forma que a maior parte do dispositivo seja submetida a valores elevados de tensão e desta forma aumentar a capacidade de dissipação de energia do dispositivo.

Para uma melhor compreensão do exposto, na Figura 5.16 é apresentada a evolução da distribuição de tensão do dispositivo de ranhuras verticais até obter o modelo TO2. É importante esclarecer que os elementos com maior tonalidade de azul representam as áreas ausentes de material.

Na Figura 5.16 pode-se observar que na iteração 1 a parte lateral do dispositivo contém um grande número de elementos com baixos valores de esforços, posteriormente, conforme o processo de otimização avança, os elementos vazios são concentrados naquela área e a distribuição de tensões no dispositivo começa a ficar mais uniforme.

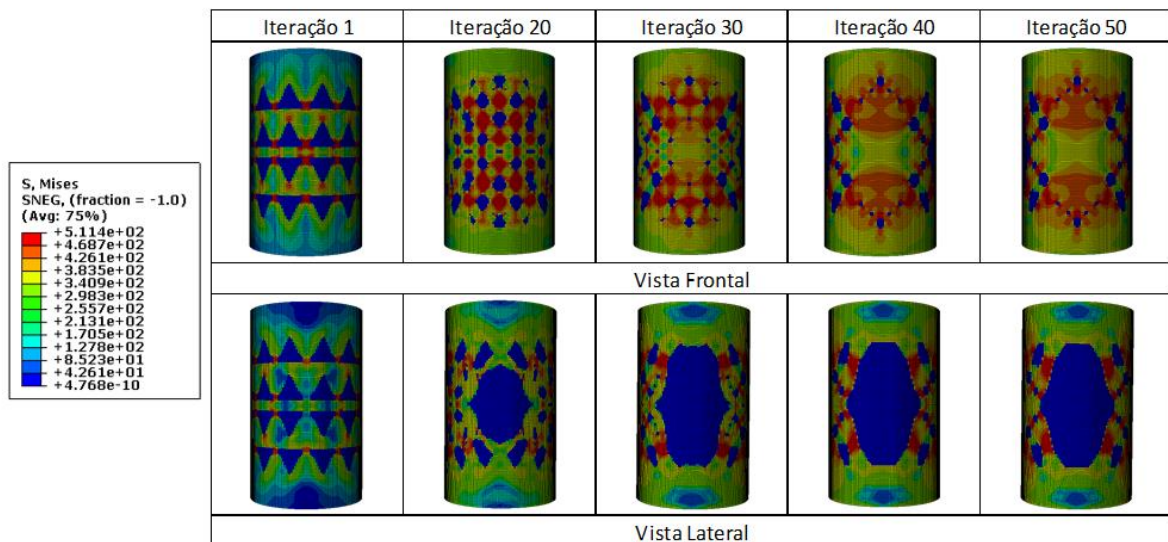


Figura 5.16 - Evolução da distribuição de tensões no modelo vertical até a obtenção do dispositivo TO2

O resultado das tensões nas configurações iniciais é apresentado na Figura 5.17, podendo-se observar que os focos de tensões máximas variam no dispositivo dependendo da distribuição das ranhuras. O modelo de dissipador com ranhuras circular apresentou áreas com maiores focos de tensões e foi essa configuração que apresentou a melhor capacidade de dissipação em relação com as outras configurações iniciais, no entanto, esta vantagem inicial não garantiu que iria atingir a forma ideal em menos tempo como foi apresentado anteriormente.

Os demais dispositivos apresentaram concentração de tensões nos vértices de suas ranhuras, porém, não possuem a mesma extensão no que diz respeito à configuração das ranhuras circulares, portanto o modelo inicial com ranhuras circulares obtém maior capacidade de dissipação de energia, por sujeitar a uma maior quantidade de material para altos valores de tensão.

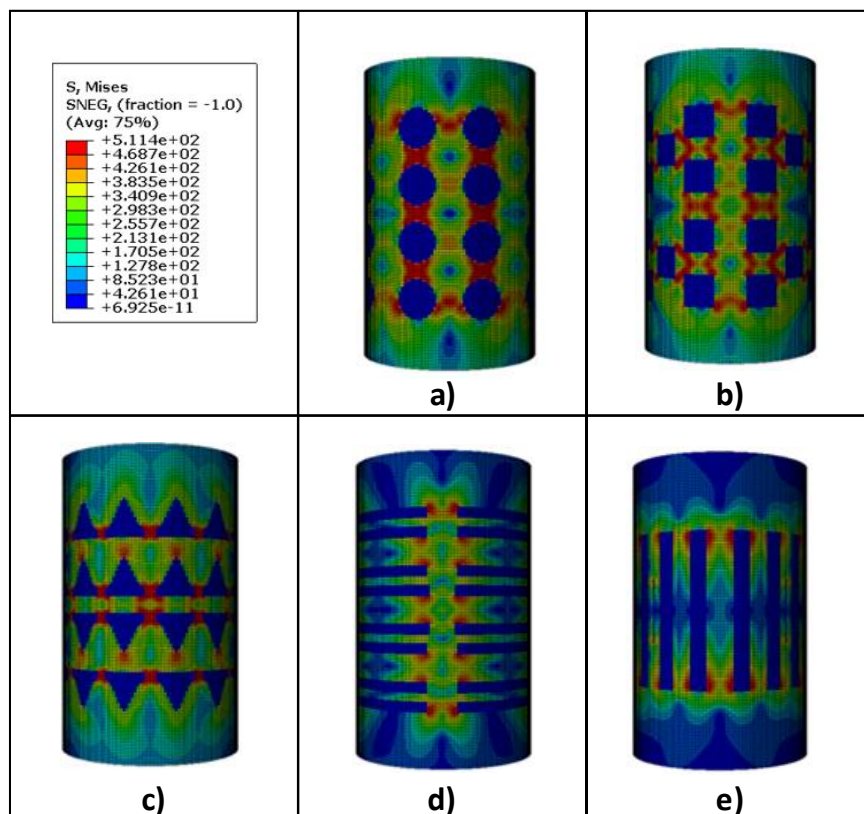


Figura 5.17 - Distribuição de tensões nos modelos iniciais

Analisando a distribuição de tensões dos dispositivos com ranhuras horizontais e verticais, é possível compreender o fato de que esses dois modelos de dissipadores apresentam menor capacidade de dissipação, visto que grande parte do material está submetido a baixos valores de esforços, porém, esta condição permitiu modificar um maior número de elementos após a primeira análise de elementos finitos, alcançando ao final do processo de otimização o maior aumento na capacidade de dissipação de energia.

Em relação à distribuição dos esforços nos modelos otimizados, levando em consideração a Figura 5.18 e os resultados apresentados na Tabela 5.2 onde são apresentados os valores de capacidade de dissipação dos modelos otimizados, pode-se observar que os modelos de dissipadores que apresentaram melhor desempenho foram aqueles que conseguiram mover a maior quantidade de elementos vazios para a lateral do dispositivo.

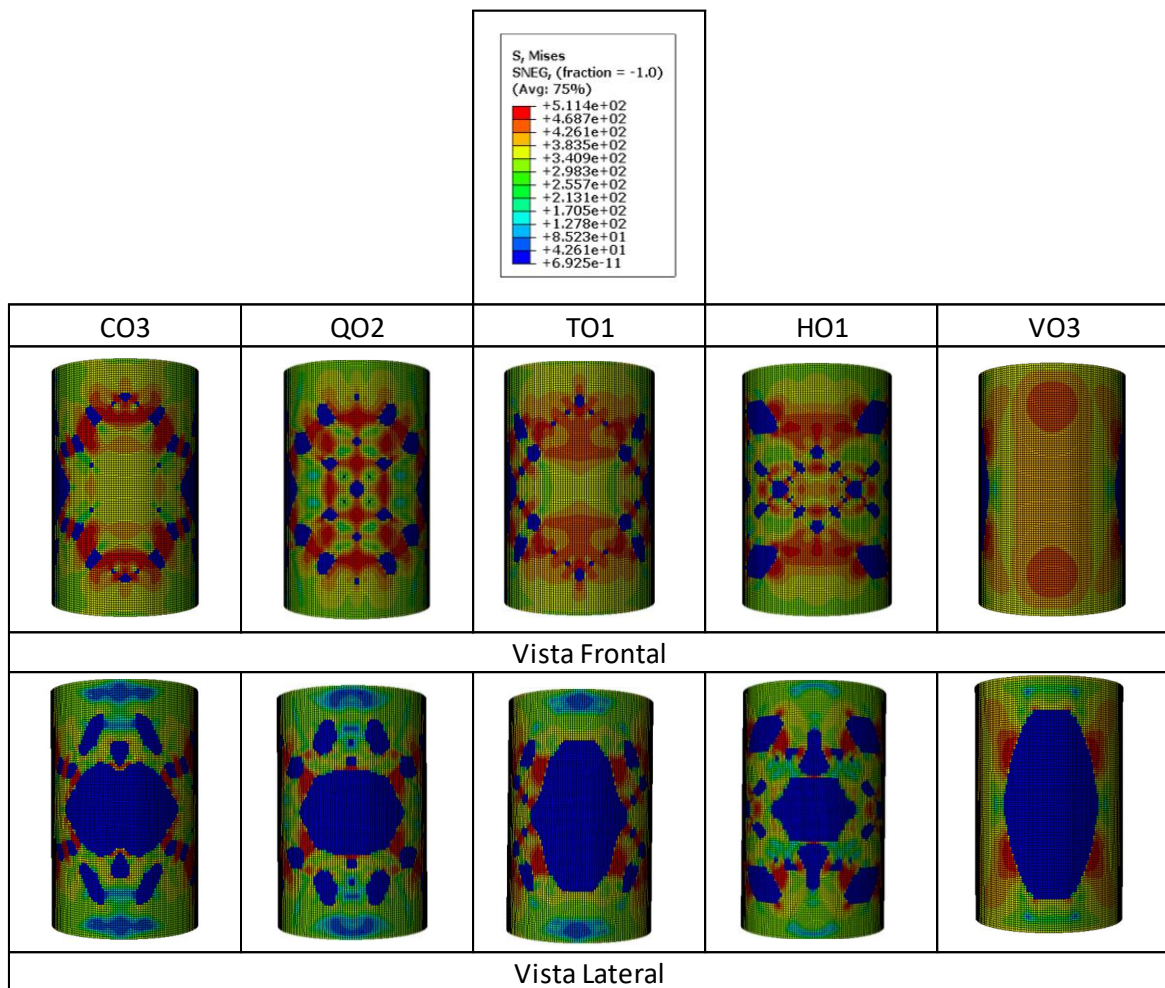


Figura 5.18 - Distribuição de tensões nos modelos otimizados

O dispositivo VO3 é o modelo de dissipador com as menores áreas de baixa tensão e, embora tenha menos focos de concentração de tensão em comparação com os outros modelos, possui uma distribuição mais uniforme de tensões em todo o dispositivo.

5.2 Ciclos de Histerese dos Dissipadores Metálicos Cilíndricos Ranhurados

Tensões e forças têm uma relação diretamente proporcional, portanto, o aumento das tensões nos elementos também representa um aumento na força gerada pelo protocolo de carga fornecido. Da Equação 2.5 estabelece-se a relação entre a energia dissipada, os deslocamentos e a força de resposta ao deslocamento, portanto, o aumento na força representa um aumento da área sob a curva da relação que representa a energia dissipada pelo dispositivo. Nas Figuras 5.19 a 5.23 são comparadas as curvas de histerese de cada um dos modelos de dissipadores analisados na configuração inicial e em suas respectivas configurações otimizadas.

Nas Figuras 5.19 a 5.23 pode-se apreciar a diferença entre as curvas de histerese dos modelos iniciais e seus respectivos resultados otimizadas, pode-se observar que todos os modelos otimizadas para o ciclo de carga fornecido apresentaram comportamento estável, adicionalmente pode-se observar que a diferença entre os formatos das curvas é significativa, apresentando maior área, ou seja, demonstrando uma capacidade de dissipação superior.

A Figura 5.19 apresenta o ciclo de histerese do modelo circular e do modelo CO3 otimizadas, o modelo inicial apresenta uma força máxima de 382 N enquanto o modelo otimizadas atinge uma força máxima de 688 N, que se reflete no tamanho da curva de histerese, além disso, uma curva de histerese estável pode ser observada para ambos dos dispositivos.

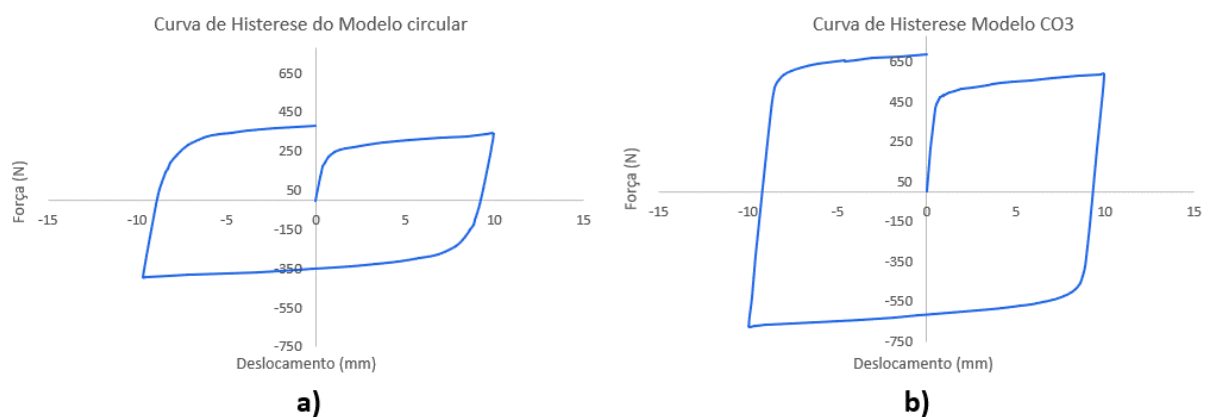


Figura 5.19 - Ciclo de histerese a) Modelo circular b) Modelo CO3

O comportamento histórico do dispositivo com ranhuras quadradas e seu respectivo modelo otimizado é apresentado na Figura 5.20, da mesma forma para este par de curvas é possível observar um comportamento estável com maior amplitude para o dispositivo QO2.

O modelo inicial atingiu uma força máxima de 340 N enquanto o dispositivo otimizado apresentou uma força máxima de 670 N.

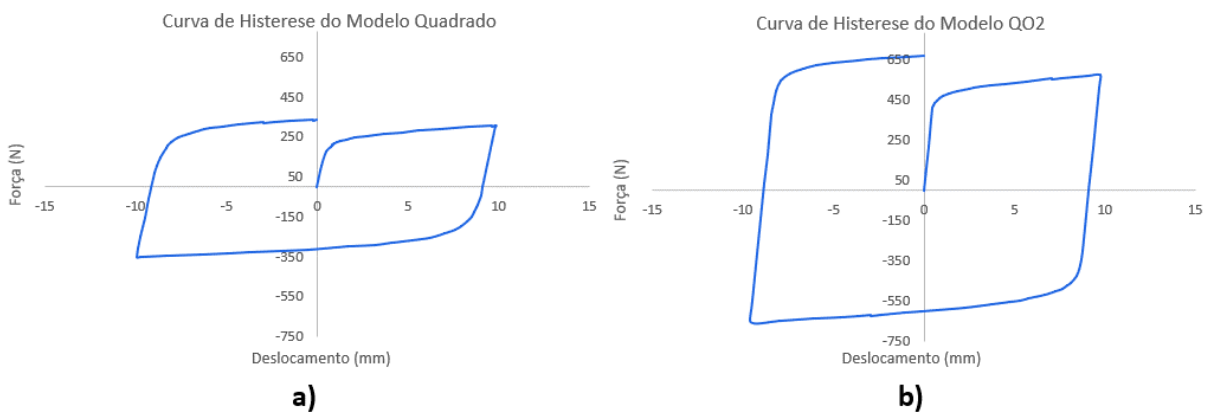


Figura 5.20 - Ciclo de histerese a) Modelo Quadrado b) Modelo QO2

A comparação dos ciclos de histerese do modelo triangular e do dispositivo otimizado gerado a partir desta configuração é apresentada na Figura 5.21.

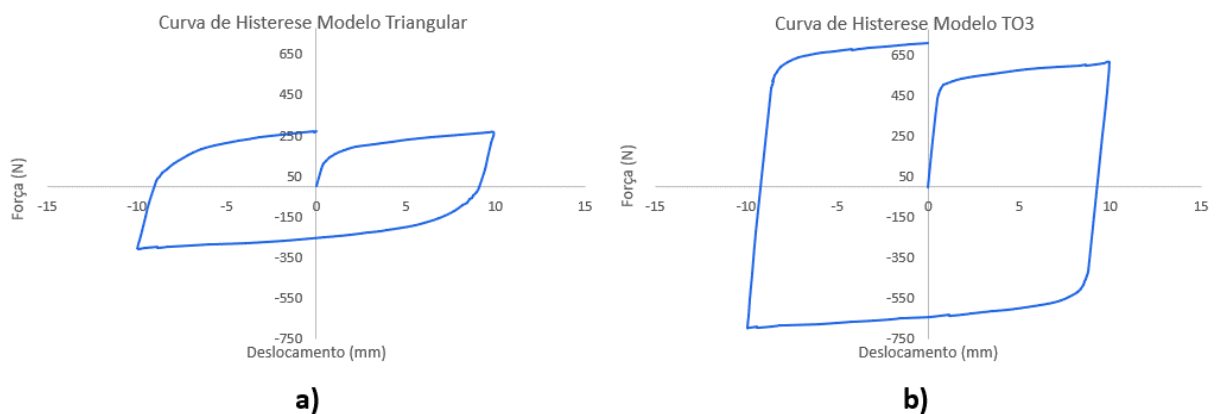


Figura 5.21 - Ciclo de histerese a) Modelo Triangular b) Modelo TO3

Pela Figura 5.21 pode-se observar que ambos os dispositivos apresentam curvas de histerese estáveis com uma diferença de amplitude de 437 N.

Para o caso do dispositivo com ranhuras horizontais, a Figura 5.22 a) apresenta uma curva de baixa amplitude com indícios de instabilidades o que representa uma pobre dissipação de energia, por outro lado, a figura correspondente ao modelo HO1 (Figura 5.22 b)) é significativamente mais ampla atingindo um valor máximo na força de reação de 644 N.

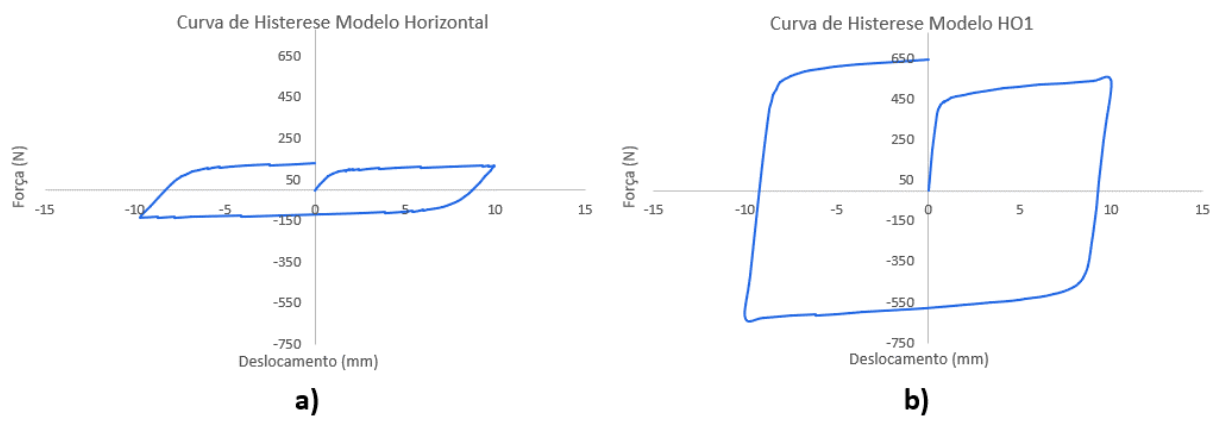


Figura 5.22 - Ciclo de histerese a) Modelo Horizontal b) Modelo HO1

Finalizando os ciclos de histerese dos dispositivos, a Figura 5.23 apresenta as curvas de histerese do modelo vertical e do dispositivo VO3. A partir desta figura pode-se observar que a curva de histerese do modelo inicial apresenta baixa amplitude, o que era uma situação esperada sabendo que este dispositivo era o que tinha a menor capacidade de dissipação.

Na Figura 5.23 b) pode-se observar uma curva de alta amplitude e comportamento estável, além disso, pode-se observar que a inclinação nesta curva é maior, o que representa uma maior rigidez inicial, característica desejável neste tipo de dispositivo.

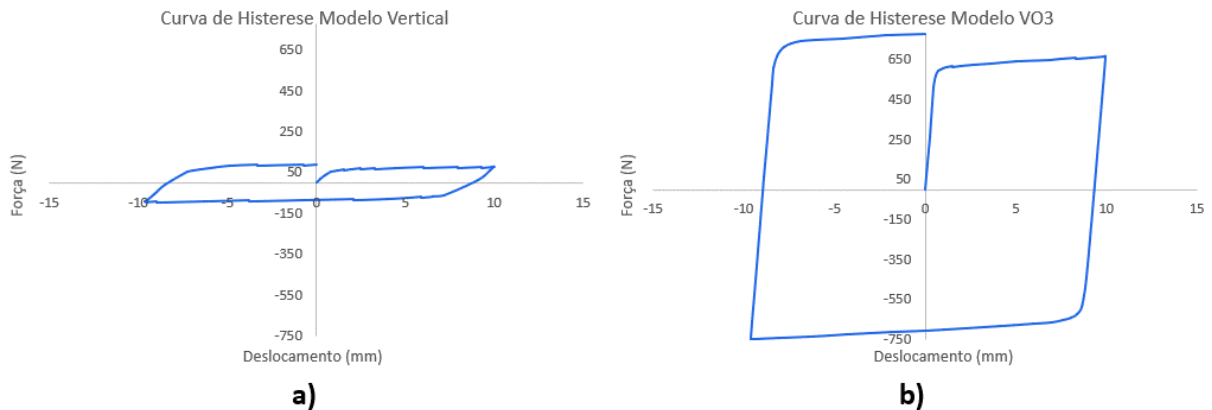


Figura 5.23 - Ciclo de histerese a) Modelo Vertical b) Modelo VO3

5.3 Relação Dissipação de Energia / Massa

Para comparar a eficiência dos dispositivos otimizados, foi determinada a relação entre a capacidade de dissipação de energia e a massa do dispositivo, além disso foram introduzidos os valores correspondentes ao modelo do dispositivo sem ranhuras, denominado modelo original.

A Tabela 5.3 apresenta a comparação de desempenho dos dispositivos analisados e as características do modelo original. Esta tabela mostra os valores de dissipação de energia, massa e a relação dessas variáveis para cada dispositivo. Adicionalmente são apresentados dois valores adimensionais denominados coeficiente de energia e coeficiente de relação dissipação de energia / massa. Ambos os coeficientes são calculados em relação aos valores correspondentes do dissipador de original.

Da Tabela 5.3 pode-se observar que três dos dispositivos otimizados possuem uma melhor relação de dissipação de energia por unidade de massa do que o dispositivo original, esses dispositivos são os modelos CO3, TO3 e VO3.

Embora a massa dos dispositivos otimizados seja próxima a 77% do dispositivo original, os modelos TO3 e VO3 atingiram um coeficiente de dissipação de energia superior a este valor,

obtendo uma capacidade de dissipação de energia em relação ao modelo original de 84% e 91%, respectivamente.

Tabela 5.3 – comparação da eficiência dos modelos otimizados

Dispositivo	Original	CO3	QO2	TO3	HO1	VO3
Dissipação de energia (J)	6154	4814	4660	5179	4324	5573
Massa (kg)	1,94	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Relação Dissipação de energia / massa	3172	<u>3209</u>	3107	<u>3453</u>	2883	<u>3715</u>
Coefficiente de energia em relação ao modelo original	1	0,78	0,76	<u>0,84</u>	0,7	<u>0,91</u>
Coefficiente de relação energia / massa em relação ao modelo original	1	1,01	0,98	1,09	0,91	<u>1,17</u>

Por fim, analisando o coeficiente da relação de dissipação de energia - massa, pode-se observar que o dispositivo VO3 obtém um desempenho 17% superior ao modelo original, o que significa que faz sentido usar um dispositivo mais leve e com alta capacidade de dissipação de energia.

6. CONCLUSÕES

O processo de otimização foi realizado através da interação de um software de elementos finitos encarregado de determinar o comportamento do dispositivo submetido a um protocolo de deslocamento cíclico, o algoritmo de otimização de recozimento simulado encarregado de orientar a busca pela melhor configuração e o uso de heurísticas baseadas no conhecimento do problema para melhorar o processo de convergência. A função objetivo do problema de otimização é a maximização da capacidade de dissipação de energia (CDE) do dispositivo para o protocolo de carregamento fornecido.

O processo de otimização começa com uma configuração de dispositivo com ranhura predefinida pelo usuário. Neste trabalho, o efeito da configuração inicial selecionada no resultado otimizado foi estudado através da geração de dispositivos com ranhuras circulares, quadradas, triangulares, horizontais e verticais. Três execuções do processo de otimização foram realizadas levando em consideração a natureza estocástica tanto do algoritmo de otimização quanto das heurísticas de mudança de forma. Um maior número de execuções não foi considerado devido ao custo computacional envolvido no desenvolvimento de um problema de otimização desta natureza.

O processo de otimização foi realizado de forma independente para cada uma das configurações, de forma que aquela com ranhuras verticais (CDE 540 J) permitiu obter o dispositivo com maior CDE (5573 J) utilizando um menor número de iterações para convergência. Ao analisar as execuções realizadas neste dispositivo, foram obtidos dois modelos otimizados com diferença significativa no CDE, isto ocorre porque para esta configuração surgem duas alternativas de otimização em função da condição estocástica do algoritmo e das heurísticas de modificação em conjunto com a disponibilidade de elementos para modificar após a primeira análise. O dispositivo otimizado que apresentou o menor CDE foi o dispositivo gerado a partir da configuração de ranhuras horizontal (CDE 737), obtendo-se um modelo de dissipador com CDE de 4415 J. Pode-se observar que, para ambos os dispositivos, o aumento no CDE dos modelos otimizados é mais de 4 vezes o CDE do modelo inicial. Todos os dispositivos otimizados apresentaram comportamento de histerese estável.

Observou-se que o dispositivo otimizado gerado a partir da configuração com ranhuras verticais (VO3) possui um coeficiente de dissipação de energia - massa 17% maior que o dispositivo original, além disso, apesar de possuir cerca de 77% da massa do dispositivo original, a capacidade de dissipação de energia em relação ao modelo original é de 91%. Em relação aos modelos otimizados obtidos, observou-se que o dispositivo com maior CDE apresenta um formato favorável para fabricação.

Por fim, pode-se concluir que o modelo VO3 pode representar uma boa alternativa como dispositivo de proteção estrutural por apresentar boa capacidade de dissipação de energia, curva de histerese estável, menor peso em relação ao dispositivo original e formato simples que permite sua construção mediante processos de manufatura convencional.

Desta forma, acredita-se que a metodologia proposta neste trabalho pode ser utilizada como uma ferramenta eficaz para melhorar o projeto de dissipadores metálicos, obtendo configurações com maior capacidade de dissipação de energia e menor massa, ou seja, melhor relação custo - benefício.

6.1 Sugestões para Trabalho Futuros

Embora entre as características do dispositivo analisado neste estudo esteja a capacidade de suportar cargas em duas direções, o processo de otimização foi realizado para apenas uma direção. Então sugere-se realizar o processo aplicando um protocolo de carga bidirecional.

Sugere-se realizar o processo variando os valores de espessura do dispositivo e avaliar a relação da capacidade de dissipação do dispositivo com este parâmetro.

Este estudo utiliza as propriedades mecânicas do aço convencional. Assim, sugere-se implementar o processo de otimização utilizando as propriedades de outro tipo de aço, especialmente aço de baixo ponto de escoamento.

Recomenda-se implementar a metodologia utilizando um algoritmo de otimização diferente e comparar os resultados obtidos com os apresentados neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aarts, E. and Korst, J. **Simulated annealing and Boltzmann machines**. Chichester: John Wiley & Sons, 1997.

Abebe, D., Kim, J. W. e Choi, J. H. Hysteresis Characteristics of Circular Pipe Steel Damper Using LYP225, **Steel Innovations Conference**, Christchurch, New Zealand, 2013.

Abebe, D., J. Jang, J. Choi: Analytical Evaluation on Structural Performance and Optimum Section of CHS Damper, **International Journal of Civil and Environmental Engineering**, Vol:9, No:8, 2015.

Abebe, D., Jeong, S. J., Getahun, B. M., Segu, D. Z. e Choi, J. H. Hysteretic characteristics of shear panel damper made of low yield point steel, **Materials Research Innovations**, vol. 19, no. 5, p. S5-902-S5-910, 2015

Abebe, D., Kim, J., Gwak, G. e Choi, J. Low-Cycled Hysteresis Characteristics of Circular Hollow Steel Damper Subjected to Inelastic Behavior, **International Journal of Steel Structures**, vol. 19, no. 1, p. 157-167, 2018

Arora, J. **Introduction to Optimum Design**. Academic Press, Boston, 2012.

Bannantine JA, Comer JJ, Handrock JL. **Fundamental of metal fatigue analysis**. Prentice Hall.1990.

Berastegui, C. **Otimização de Pórticos de Aço e Amortecedores Viscosos Sob Excitação Sísmica**, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

Brandão, F. **Otimização de atenuadores dinâmicos sincronizados para o controle de vibrações em edifícios submetidos à excitação sísmica**, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

Bendsøe, M. and Sigmund. **Topology optimization**. John Wiley & Sons Inc., Berlin, 2004.

Belegundu, A. e Chandrupatla, T. **Optimization concepts and applications in engineering**. Cambridge University Press. 2014.

Christenson, R. **Semiactive Control of Civil Structures for Natural Hazard Mitigation**, Analytical and Experimental Studies, Tese de Doutorado, University of Notre Dame 2001.

Curadelli, R. **Controle de Vibrações em Estruturas Usando Amortecedores Metálicos**, Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

Chan, R. e Albermani, F. Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation, **Engineering Structures**, vol. 30, no. 4, p. 1058-1066, 2008.

Chan, R., Albermani, F. e Williams, M. Evaluation of yielding shear panel device for passive energy dissipation, **Journal of Constructional Steel Research**, vol. 65, no. 2, p. 260-268, 2009.

Chan, R., Albermani, F. e Kitipornchai, S. Experimental study of perforated yielding shear panel device for passive energy dissipation, **Journal of Constructional Steel Research**, vol. 91, p. 14-25, 2013.

Christensen, P. e Klarbring, A. **An introduction to structural optimization**, Springer, Amsterdam, 2009.

Constantinou, M., Soong, T. and Dargush, G. Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit. **Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research**. 1998.

Farkas, J. and Jármai, K. **Optimum design of steel structures**. Springer, Berlin, 2013.

Chong, E. and Zak, S. **An Introduction to Optimization**, 4th Edition. John Wiley & Sons. 2013.

FEMA-416. **Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components**. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC (USA), 2017.

Chopard, B. e Tomassini M. **An introduction to metaheuristics for optimization**. Springer, Switzerland, 2018.

Deng, K., Pan, P., Sun, J., Liu, J. e Xue, Y. Shape optimization design of steel shear panel dampers, **Journal of Constructional Steel Research**, vol. 99, p. 187-193, 2014.

Dreo, J. **Metaheuristics for hard optimization**. Springer. 2006.

Ghaffary, A., e Mohammadi, R. Framework for virtual hybrid simulation of TADAS frames using openses and abaqus, **Journal of Vibration and Control**, vol. 24, no. 11, p. 2165-2179, 2016.

Ghabraie, K., Chan, R., Huang, X. e Xie, Y. Shape optimization of metallic yielding devices for passive mitigation of seismic energy, **Engineering Structures**, vol. 32, no. 8, p. 2258-2267, 2010.

Garivani, S., Aghakouchak, A. e Shahbeyk, S. Numerical and experimental study of comb-teeth metallic yielding dampers, **International Journal of Steel Structures**, vol. 16, no. 1, p. 177-196, 2016.

J. H. Holland, **Adaptation in Natural and Artificial Systems**, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.

Huang, X. e Xie, Y. Bi-directional evolutionary topology optimization of continuum structures with one or multiple materials, **Computational Mechanics**, vol. 43, no. 3, p. 393-401, 2008.

Huang, X. e Xie, Y. A further review of ESO type methods for topology optimization, **Structural and Multidisciplinary Optimization**, vol. 41, no. 5, p. 671-683, 2010.

He, H., Wang, X., e Zhang, X. Energy-Dissipation Performance of Combined Low Yield Point Steel Plate Damper Based on Topology Optimization and Its Application in Structural Control, **Advances in Materials Science and Engineering**, vol. 2016, p. 1-16, 2016.

Javanmardi, A., Ibrahim, Z., Ghaedi, K., Benisi Ghadim, H. Hanif, M. State-of-the-Art Review of Metallic Dampers: Testing, Development and Implementation, **Archives of Computational Methods in Engineering**, vol. 27, no. 2, p. 455-478, 2019.

Kelly J.M., Skinner R.I., Heine A.J. Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures. **Bull N Z Natl Soc Earthq Eng**, vol 5, p. 63–88, 1972.

Lewiński, T. e Rozvany, G. **Topology optimization in structural and continuum mechanics**, Springer, Vienna, 2014.

Laarhoven, P. and Aarts, E. **Simulated annealing**. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 2010.

Millán, C., Begambre, O. e Millán, E. Propuesta y validación de un algoritmo Simulated annealing modificado para la solución de problemas de optimización, **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, vol. 30, no. 4, p. 264-270, 2014.

Marko J **Influence of damping systems on building structures subject to seismic effects**. PhD thesis, Queensland University of Technology, 2006.

Maleki, S. e Bagheri, S. Pipe damper, Part I: Experimental and analytical study, **Journal of Constructional Steel Research**, vol. 66, no. 8-9, p. 1088-1095, 2010.

Maleki, S. e Mahjoubi, S. Dual-pipe damper, **Journal of Constructional Steel Research**, vol. 85, p. 81-91, 2013.

Oviedo, J., Duque, M. Sistemas de Control de Respuesta Sísmica en Edificaciones, **Revista EIA**, vol. 6, p. 105-120, 2006.

Oviedo, J., Duque, M. Situación de las Técnicas de Control de Respuesta Sísmica en Colombia, **Revista EIA**, vol. 12, p. 113-124, 2009.

Ontiveros, S. **Otimização Simultânea de Posições e Forças de Amortecedores de Vibração por Atrito para Controle de Vibrações de Estruturas**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

Rao, S. **Engineering optimization**. John Wiley & Sons Inc, Hoboken, 2009.

Rothwell, A. **Optimization methods in structural design**. Springer, Cham, 2017.

Symans, M., Charney, F., Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments, **Journal of Structural Engineering**, vol. 134, no. 1, p. 3-21, 2008.

Skinner RI, Kelly JM, Heine AJ, Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics** , vol. 3, p. 287– 296, 1974.

Soong, T. e Spencer, B. Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice, **Engineering Structures**, vol. 24, no. 3, p. 243-259, 2002.

Saaed, T., Nikolakopoulos, G., Jonasson, J. e Hedlund, H. A state-of-the-art review of structural control systems, **Journal of Vibration and Control**, vol. 21, no. 5, p. 919-937, 2013.

Talbi, E. **Metaheuristics**. John Wiley & Sons Inc., New York, 2009.

Teruna, D., Majid, T. e Budiono, B. Experimental Study of Hysteretic Steel Damper for Energy Dissipation Capacity, **Advances in Civil Engineering**, vol. 2015, p. 1-12, 2015.

Tong, J., Guo, Y., Pan, W., Zhou, P. e Wang, M. Hysteretic performance of inverted-V patterned BRB systems considering vertical pre-compression effects, **Bulletin of Earthquake Engineering**, vol. 17, no. 6, p. 3197-3232, 2019.

Utomo, J., Moestopo, M., Surahman, A. e Kusumastuti, D. Applications of vertical steel pipe dampers for seismic response reduction of steel moment frames, **MATEC Web of Conferences**, vol. 138, p. 02002, 2017.

Uang, C., and Bertero, V. V. Evaluation of seismic energy in structures. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 19(1), 77–90.1990.

Vellar, L. **Otimização de Amortecedores de Massa Sintonizados em Estruturas Submetidas a um Processo Estacionário**, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

Whittaker, A., Bertero, V., Thompson, C. and Alonso, L. Seismic Testing of Steel Plate Energy Dissipation Devices. **Earthquake Spectra**, vol. 7 (4), p.563-604, 1991.

Yang, X. **Engineering optimization**. John Wiley & Sons Inc, New Jersey, 2010.

Zhang, C., Zhang, Z. e Shi, J. Development of high deformation capacity low yield strength steel shear panel damper, **Journal of Constructional Steel Research**, vol. 75, p. 116-130, 2012.

Zhang, X. e Zhu, B. **Topology Optimization of Compliant Mechanisms**. John Wiley & Sons Inc 2018.

Zuo, Z. e Xie, Y. A simple and compact Python code for complex 3D topology optimization, **Advances in Engineering Software**, vol. 85, p. 1-11, 2015.