

**OTIMIZAÇÃO BI-NÍVEL DE PÓRTICOS PLANOS DE AÇO COM
LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS**

GUSTAVO HEITOR DA COSTA SANTOS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

DEZEMBRO DE 2021

OTIMIZAÇÃO BI-NÍVEL DE PÓRTICOS PLANOS DE AÇO COM LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS

GUSTAVO HEITOR DA COSTA SANTOS

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.”

Orientador: Prof. Gines Arturo Santos Falcón

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
DEZEMBRO DE 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

S237

Santos, Gustavo Heitor da Costa.

Otimização Bi-Nível de Pórticos Planos de Aço com Ligações Semirrígidas / Gustavo Heitor da Costa Santos. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2021.

128 f. : il.

Bibliografia: 98 - 102.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2021.

Orientador: Gines Arturo Santos Falcon.

1. Pórticos de aço. 2. Análise estrutural não-linear. 3. Otimização multinível. 4. Estruturas em aço. 5. Algoritmo genético. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

OTIMIZAÇÃO BI-NÍVEL DE PÓRTICOS PLANOS DE AÇO COM LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS

GUSTAVO HEITOR DA COSTA SANTOS

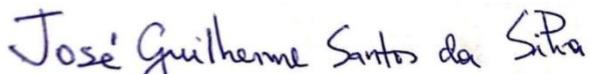
“Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.”

Aprovado em 07 de Dezembro de 2021.

Comissão examinadora:



Prof. Sérgio Rafael Cortes de Oliveira (D. Sc., Engenharia Civil) – IFF/Campos



Prof. José Guilherme Santos da Silva (D. Sc., Engenharia Civil) – UERJ



Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima (D. Sc., Engenharia Civil) – UERJ



Prof. Gines Arturo Santos Falcón (D. Sc., Engenharia Civil) – UENF
Orientador

“E mais tarde, ao ficar sabendo, por meio de histórias, quão grande era o mar e que nele se podia navegar durante dias com navios sem ver terra alguma, nada mais o seduzia tanto quanto imaginar que estava num desses navios, lá em cima, na cesta da gávea, no mastro da frente, a voar aí dentro através do infinito aroma do mar, que, a rigor, nem era um aroma, mas um hálito, um sopro, o fim de todos os odores, e se desfazia de prazer nesse hálito.”

Patrick Süskind, “Das Parfum”

AGRADECIMENTO

Ao meu pai, José Carlindo, e minha mãe, Tania Regina, que sempre priorizaram minha criação, garantindo-me o que de melhor podiam prover em educação desde a primeira idade, tanto em formação escolar quanto em formação cidadã.

Aos meus professores, que participaram ativamente da minha formação, em especial os professores Gines e Guilherme do laboratório de engenharia civil da UENF, junto aos quais tive mais profundo contato com a ciência durante a graduação, sem o qual não tomaria a decisão de realizar este trabalho.

Àqueles que fomentam a ciência em âmbito nacional, em especial a CAPES, que financiou este trabalho.

Aos meus amigos e minha irmã, que testemunharam todos os dias em que este trabalho me trouxe alegria e descontentamento e escutaram prontamente às minhas palavras de entusiasmo e frustração, mesmo que por vezes não pudessem compreender os motivos para tais sentimentos, sendo sempre solícitos em me oferecer ajuda.

Finalmente, novamente ao Prof. Dsc. Gines Falcón, dessa vez porque além de professor em minha graduação assumiu o papel de orientador em minha pós-graduação, sendo essencial na elaboração deste trabalho.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS.....	xii
Letras latinas.....	xii
Letras gregas.....	xv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivo.....	3
1.2. Justificativa.....	4
2. Revisão Bibliográfica.....	6
3. Fundamentação Teórica.....	11
3.1. Análise Estrutural Não-Linear.....	11
3.2. Ligações Semirrígidas.....	14
3.3. Método das Componentes.....	16
3.3.1. Componente 1 – Alma da coluna ao corte.....	18
3.3.2. Componente 2 – Alma da coluna em compressão.....	19
3.3.3. Componente 3 – Alma da coluna à tração.....	19
3.3.4. Componente 4 – Mesa da coluna à flexão.....	20
3.3.5. Componente 5 – Placa de extremidade à flexão.....	21
3.3.6. Componente 10 – Parafusos à tração.....	21
3.3.7. Rigidez de Ligações Semirrígidas.....	22

3.4.	Análise Estrutural de Pórticos com Ligações Semirrígidas.....	24
3.4.1.	Análise Linear	26
3.4.2.	Análise não-linear	28
3.5.	Dimensionamento de pórticos planos em aço	30
3.5.1.	Elementos submetidos à compressão axial.....	30
3.5.1.1.	Fator de redução Q.....	32
3.5.1.2.	Coeficiente de Flambagem K.....	34
3.5.2.	Elementos submetidos a momento fletor.....	37
3.5.2.1.	Estado Limite FLA.....	37
3.5.2.2.	Estado Limite FLM	39
3.5.2.3.	Estado Limite FLT.....	41
3.5.3.	Elementos submetidos a flexo-compressão	42
3.5.4.	Limitação do índice de esbeltez.....	42
3.5.5.	Deslocamentos máximos.....	43
3.6.	Otimização Estrutural.....	44
3.7.	Otimização Multinível.....	47
3.8.	Algoritmo Genético	48
3.8.1.	Definições	49
3.8.1.1.	Indivíduo ou Cromossomo	49
3.8.1.2.	População.....	49
3.8.1.3.	Geração	50
3.8.1.4.	Gene	50
3.8.2.	Funcionamento do Algoritmo Genético.....	50
4.	Metodologia desenvolvida	56
4.1.	Considerações da otimização global	56
4.1.1.	Variáveis de projeto	56
4.1.2.	Função objetivo	57

4.1.3. Restrições.....	57
4.2. Considerações da otimização local	58
4.2.1. Variáveis de projeto	58
4.2.2. Função objetivo	59
4.2.3. Restrições.....	60
4.3. Algoritmo de otimização.....	60
4.3.1. Validação da análise estrutural do pórtico	67
4.3.2. Validação da análise das ligações	69
5. Resultados.....	72
5.1. Primeira implementação: Pórtico P1v2a	74
5.1.1. Resultados e discussão	75
5.2. Segunda implementação: Pórtico P3v2a	79
5.2.1. Resultados e discussão	81
5.3. Terceira implementação: Pórtico P3v10a	87
5.3.1. Resultados e discussão	91
6. Considerações Finais	95
6.1. Sugestões para trabalhos futuros	96
7. Referências Bibliográficas	98
APÊNDICE 1 – MÓDULOS COMPUTACIONAIS IMPLEMENTADOS	103
A. Funções AE	103
B. Funções FRP	105
C. Funções FRL	106
D. Funções OE	107
E. Funções Fun e o programa PP_Otim_Port_SRC_Multi.....	110

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1: Pórticos com ligações rígidas (a) e flexíveis (b) (Figueiredo, 2004).....	3
--	---

CAPÍTULO 3

Figura 3.1: Representação dos métodos de Newton-Raphson (a) e Newton-Raphson Modificado (b) (Souza <i>et al.</i> , 2019)	13
Figura 3.2: Gráfico de momento x rotação de ligações viga-pilar com classificação de ligações flexíveis (3), semirrígidas (2) e rígidas (1) (CEN, 2011)	15
Figura 3.3: Possíveis componentes ativas no método das componentes (Lima, 2003).....	17
Figura 3.4: Modelo para simulação do comportamento de ligações semirrígidas (Lima, 2003)	17
Figura 3.5: Definição de parâmetros geométricos de ligações parafusadas. (CEN, 2011) ..	20
Figura 3.6: Elemento com ligações semirrígidas (Chen, 2000)	25
Figura 3.7: Representação de função roleta (Arora, 2012).....	51
Figura 3.8: Cruzamento com ponto único de corte antes (a) e depois (b) da realização do procedimento (Arora,2012).	53
Figura 3.9: Cruzamento com par de pontos de corte antes (a) e depois (b) da realização do procedimento (Arora,2012).	53
Figura 3.10: Fluxograma com representação do funcionamento do algoritmo genético.	55

CAPÍTULO 4

Figura 4.1: Ligação de chapa de extremidade adotada na otimização.	58
Figura 4.2: Fluxograma de otimização estrutural bi nível	62
Figura 4.3: Fluxograma com AG para otimização global.	63
Figura 4.4: Fluxograma com AG para otimização local.	64
Figura 4.5: Compartilhamento de dados entre as otimizações global e local.	65
Figura 4.6: Modelo estrutural proposto no exemplo exs6 do CALFEM (Austrell <i>et al.</i> , 2004).	67

CAPÍTULO 5

Figura 5.1: Pórtico plano P1v2a proposto por Simões (1996).	74
Figura 5.2: Restrições do problema do pórtico P1v2a.....	77

Figura 5.3: Pórtico plano P3v2a proposto por Cabrero e Bayo (2005).	79
Figura 5.4: Grupos de elementos do pórtico P3v2a (Sánchez-Olivares e Espín, 2013).	80
Figura 5.5: Restrições da otimização do pórtico P3v2a.....	85
Figura 5.6: Pórtico P3v10a proposto por Sánchez-Olivares e Espín (2013).....	87
Figura 5.7: Grupos de otimização de perfis do pórtico P3v10a (Sánchez-Olivares e Espín, 2013).	89
Figura 5.8: Grupos de otimização de ligações do pórtico P3v10a (Sánchez-Olivares e Espín, 2013).	90
Figura 5.9: Restrições da otimização do pórtico P3v10a.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
AG	Algoritmo Genético;
CEN	European Committee for Standardization;
DDHS	Design-Driven Harmony Search;
ELS	Estado Limite de Serviço;
ELU	Estado Limite Último;
EN	European Standard;
FLA	Estado Limite de Flambagem Local da Alma;
FLM	Estado Limite de Flambagem Local da Mesa Comprimida;
FLT	Estado Limite de Flambagem Lateral com Torção;
FO	Função Objetivo;
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil da UENF;
LSR	Ligação Semirrígida;
MAES	Método Amplificador dos Esforços Solicitantes;
NBR	Norma Brasileira;
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

Letras latinas

A_{ef}	Área efetiva da seção transversal;
A_g	Área bruta da seção transversal;
A_s	Área da seção do parafuso;
A_{vc}	Área de corte da seção do pilar;
b	Largura da mesa;
b_a	Altura da alma do elemento comprimido;
b_{ef}	Largura efetiva das mesas;
$b_{eff,c,wc}$	Largura efetiva da coluna à compressão;
$b_{eff,c,tc}$	Largura efetiva da coluna à tração;
b_s	Altura da mesa do elemento comprimido;

C_b	Constante de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme;
C_w	Constante de empenamento;
d	Altura da seção;
d_p	Diâmetro do parafuso;
E	Módulo de elasticidade longitudinal do aço;
f_y	Tensão de escoamento do aço;
F	Força;
G	Fator de rigidez;
h	Altura da alma;
h_r	Distância entre a fileira r de parafusos e o centro da área comprimida;
I	Momento de inércia;
I_p	Momento de inércia de um pilar no plano da estrutura;
I_v	Momento de inércia da seção transversal da viga;
J	Constante de torção;
$k_{eff,r}$	Coeficiente de rigidez efetivo para a fileira r de parafusos, calculado conforme a equação (16);
k_{eq}	Coeficiente equivalente de rigidez;
K_p	Valor médio de I_p/L_p para todos os pilares no topo do andar;
K_v	Valor médio de I_v/L_v para todas as vigas do topo do andar;
k_1	Componente de rigidez relativa à alma da coluna submetida à esforço cortante;
k_2	Componente de rigidez relativa à alma da coluna submetida à compressão;
k_3	Componente de rigidez relativa à alma da coluna submetida à esforço trativo;
k_4	Componente de rigidez relativa à mesa da coluna submetida à flexão;
k_5	Componente de rigidez relativa à placa de extremidade submetida à flexão;
k_{10}	Componente de rigidez relativa à parafusos submetidos à tração;
$k_{3,r}$	Componente de rigidez relativa à alma da coluna submetida à esforço trativo para a fileira r de parafusos;

$k_{4,r}$	Componente de rigidez relativa à mesa da coluna submetida à flexão para a fileira r de parafusos;
$k_{5,r}$	Componente de rigidez relativa à placa de extremidade submetida à flexão para a fileira r de parafusos;
$k_{10,r}$	Componente de rigidez relativa à parafusos submetidos à tração para a fileira r de parafusos;
K	Coeficiente de flambagem;
l_{eff}	Menor comprimento efetivo da fileira de parafusos;
L	Comprimento de um elemento;
L_b	Dimensão obtida pela soma da distância total entre a cabeça e a porca do parafuso com metade da espessura da cabeça e da porca;
L_p	Altura do andar para um pilar;
L_v	Comprimento da viga;
m	É um valor obtido pela disposição geométrica da ligação realizada, conforme demonstrado na Figura 3.5;
m_i	Massa linear do elemento i ;
M	Momento fletor;
M_A	Momento fletor solicitante atuante na seção a 1/4 do comprimento, em módulo;
M_B	Momento fletor solicitante atuante na seção média do comprimento, em módulo;
M_C	Momento fletor solicitante atuante na seção a 3/4 do comprimento, em módulo;
M_{cr}	Momento fletor de flambagem elástica;
$M_{j,Sd}$	Momento fletor solicitante da ligação;
$M_{j,Rd}$	Momento fletor resistente da ligação;
$M_{máx}$	Momento máximo ao longo do comprimento do elemento fletido;
M_{pl}	Momento fletor de plastificação;
M_r	Momento fletor correspondente ao início do escoamento;
M_{Rd}	Momento fletor resistente;
M_{Sd}	Momento fletor solicitante;
n	Número de elementos da estrutura;

N	Esforço normal;
N_e	Força axial de flambagem elástica;
N_{Rd}	Esforço normal resistente;
N_{Sd}	Esforço normal solicitante;
P	População;
q	Carga distribuída;
Q	Fator de redução global associado à flambagem local;
Q_a	Fator de redução que leva em conta a flambagem local da alma;
Q_s	Fator de redução que leva em conta a flambagem local da mesa;
r	Raio de giração;
r_i	Grau de rigidez rotacional da ligação;
S_j	Coeficiente de rigidez da ligação;
$S_{j,ini}$	Coeficiente de rigidez inicial da ligação;
t	Altura da mesa;
t_a	Espessura da alma do elemento comprimido;
t_{fc}	Espessura da mesa da coluna;
t_p	Espessura da chapa na qual estão fixos os parafusos;
t_s	Espessura da mesa do elemento comprimido;
t_w	Largura da alma;
t_{wc}	Largura da alma da viga;
W	Módulo de resistência elástica;
z	Distância entre o centro da área tracionada e da área comprimida da mesa da coluna;
Z	Módulo de resistência plástica;
Z_{eq}	Braço de alavanca equivalente, calculado conforme a equação (15).

Letras gregas

β	Parâmetro de transformação;
ΔF	Incremento de força;
γ	Fator de segurança;
λ	Parâmetro de esbeltez;

λ_0	Índice de esbeltez reduzido;
λ_p	Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação;
λ_r	Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento;
μ	Razão entre a rigidez inicial $S_{j,ini}$ e a rigidez S_j ;
ψ	Coefficiente de ajuste para o cálculo de μ ;
σ	Tensão;
σ_r	Tensão de compressão residual nas mesas;
χ	Fator de redução associado à resistência à compressão.

RESUMO

O presente documento relata o processo de modelagem, implementação e validação de uma metodologia bi-nível de otimização de pórticos planos em aço com ligações viga-pilar semirrígidas. A otimização divide-se em dois níveis, chamados de nível global e nível local. Ambos são alternadamente executados de forma cíclica. O nível global de otimização define os perfis estruturais ótimos de vigas e pilares, considerando análise estrutural não-linear de segunda ordem, de acordo com a norma brasileira de dimensionamento de estruturas em aço. O nível local de otimização define os componentes ótimos de ligações viga-pilar por meio dos respectivos momentos fletores resistentes e rigidezes iniciais à rotação de ligações, conforme o Método das Componentes. Ambos os níveis são interdependentes e foram implementados no ambiente computacional MATLAB®, sendo o algoritmo genético utilizado no processo de otimização. No fim, o modelo proposto foi validado através da comparação de seus resultados com os verificados na bibliografia de referência.

Palavras-chave: pórticos de aço, análise estrutural não-linear, otimização multinível, estruturas em aço, Algoritmo genético.

ABSTRACT

This document presents the modeling, implementation and validation of a methodology for a two-level optimization for plane frames design with semirigid beam-column connections. The optimization levels are namely the global optimization and the local optimization. They are alternately executed in cycles. The global level defines the optimum structural profiles for beams and columns and considers 2nd order non-linear structural analysis to calculate stresses and strains, all according the Brazilian standard for steel construction. The local level defines the optimum components for beam-column connections, using the Components Method to define the design bending moment and rotational stiffness of joints. The two levels are interdependent and were implemented in MATLAB[®] computational environment using the genetic algorithm for the optimization process. In the end, the developed model was validated through the comparison of its results to the ones seen in the literature.

Keywords: steel frames, non-linear analysis, multilevel optimization, steel structures, Genetic Algorithm.

1. Introdução

Um projeto de engenharia compreende uma série de atividades bem estabelecidas, entre as quais estão análise, projeto e fabricação de sistemas. Esses processos vêm sendo desenvolvidos há séculos, no entanto, considerando a grande complexidade que problemas de engenharia podem alcançar, o aprimoramento de tais sistemas necessita de novos estudos e desenvolvimentos. Assim, uma prática recorrente no mercado é o desenvolvimento e execução de sistemas de engenharia sem que muitas vezes tenham sido feitos estudos suficientes para devida verificação de sua eficiência. Como um problema pode ser resolvido de inúmeras maneiras, os métodos utilizados nem sempre representam os sistemas mais eficientes ou econômicos (Arora, 2012).

É natural, portanto, a busca por sistemas de engenharia mais eficientes através da utilização de técnicas de otimização. Inúmeros estudos têm se aproveitado dos avanços de ferramentas de computação para desenvolvimento de sistemas mais eficientes. Esse é o contexto de origem da otimização estrutural na engenharia civil: a busca pelas estruturas mais eficientes, isto é, capazes de suportar a maior quantidade de carga pelo menor preço ou consumo de recursos.

A análise estrutural busca compreender o comportamento de estruturas através da determinação de esforços, tensões, deformações e deslocamentos nelas presentes, sendo indispensável à otimização estrutural.

A maioria das estruturas projetadas leva em consideração um comportamento linear durante o processo de análise estrutural. A consideração é amplamente difundida na engenharia civil e ajuda a simplificar os cálculos. A norma brasileira de construções em aço NBR 8800 (ABNT, 2008) prevê um método de aproximação de deslocamentos da estrutura ocasionados por comportamento não-linear, dispensando um grande volume de cálculos complexos ocasionados pela análise estrutural de 2ª ordem. Há ainda uma série de coeficientes de segurança que garantem a integridade de estruturas apesar de suas imperfeições geométricas e físicas.

Construções de grandes dimensões e complexidade são cada vez mais comuns. Considerando que o comportamento não-linear de estruturas tende a apresentar

deslocamentos de magnitudes mais elevadas e mais próximos dos reais, o estudo dos métodos de análise estrutural não-linear torna-se cada vez mais indispensável para o desenvolvimento de projetos, garantindo a eficiência e a segurança necessária (Souza *et al.*, 2019).

A análise não-linear é ainda capaz de representar melhor o comportamento das estruturas. Assim, trabalhos que necessitam de uma determinação mais precisa de esforços e deslocamentos devem utilizar este tipo de análise. É o caso da otimização estrutural, que objetiva encontrar estruturas mais eficientes. No contexto deste tipo de trabalho, a diferença entre o comportamento real de uma estrutura e o aproximado pela análise linear pode representar uma grande diferença de resultados. Os resultados da verificação estrutural são determinantes para dimensionamento de estruturas pelos códigos matemáticos. Como a otimização estrutural busca estruturas com o maior nível de otimalidade possível, obter limites de cálculo mais próximos dos limites reais de resistência das estruturas representa a possibilidade de um trabalho mais refinado.

Os códigos e normas referentes ao dimensionamento de estruturas metálicas também costumam considerar que as ligações entre vigas e pilares são sempre rígidas ou completamente flexíveis, como faz a NBR 8800 (ABNT, 2008). Este tipo de consideração é muitas vezes conveniente, visto que simplifica cálculos. É incapaz, todavia, de representar uma série de possíveis ligações de comportamento semirrígido que poderiam ser mais eficientes. A Figura 1.1 ilustra pórticos com ligações rígidas e flexíveis, conforme considerado em norma, e seus gráficos de momentos fletores e representações de deformações.

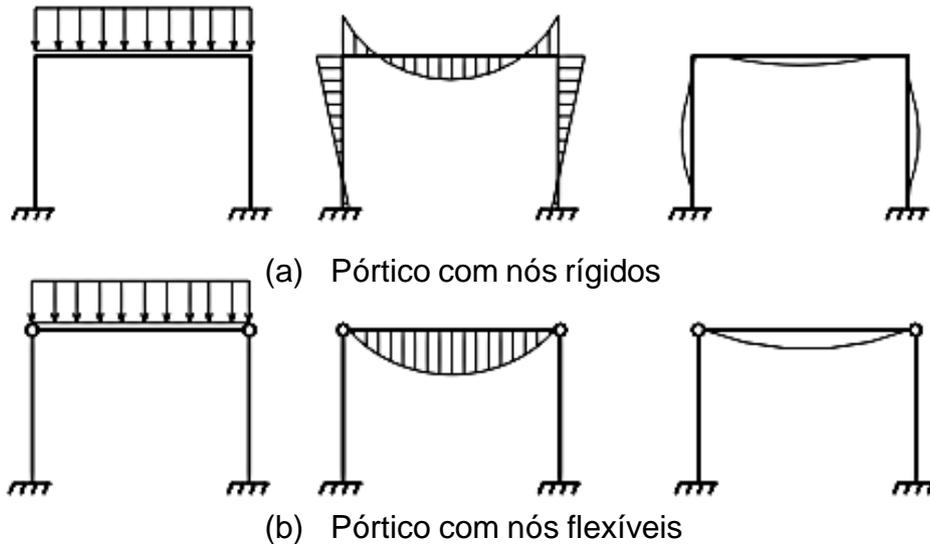


Figura 1.1: Pórticos com ligações rígidas (a) e flexíveis (b) (Figueiredo, 2004).

A realidade é que as ligações viga-pilar não apresentam um comportamento totalmente rígido ou completamente flexível, mas sim momentos fletores e deformações intermediários entre o pórtico (a) e o pórtico (b) da Figura 1.1. Esse comportamento de ligações viga-pilar denomina-se comportamento semirrígido. Uma estrutura pode apresentar um comportamento mais próximo ao pórtico (a) ou ao pórtico (b) dependendo do grau de rigidez de suas ligações.

Assim, o estudo de estruturas com ligações semirrígidas (LSRs) torna-se relevante. Uma melhor compreensão dessas ligações e da distribuição de tensões delas recorrentes, aliado à otimização estrutural e ao atual estado de desenvolvimento computacional, pode levar ao dimensionamento de estruturas mais econômicas (Carvalho *et al.*, 1998).

1.1. Objetivo

A pesquisa objetivou por desenvolver uma metodologia de otimização estrutural multinível. A otimização busca a diminuição de custos de execução de pórticos planos em aço. Foi considerado um modelo de otimização bi-nível dividido em duas etapas,

nominativamente as etapas global e local de otimização. Cada etapa funciona de forma individual, utilizando-se de algoritmos genéticos de otimização, otimizando respectivamente os perfis estruturais de vigas e pilares e as ligações viga-pilar presentes na estrutura. Assim, é necessária uma interface que realize ambas etapas de otimização e compatibilize os resultados. Para tanto, foi desenvolvida uma série de módulos computacionais no ambiente de programação do MATLAB®, acervo que que ser reutilizado em futuras pesquisas. Há ainda a consideração de análise estrutural não-linear, tal como viabilidade de semirrígido nas ligações viga-pilar, na simulação computacional. Essas considerações expandem o universo de possíveis soluções do problema e aproximam-no do comportamento de estruturas aporticadas reais. Os módulos computacionais desenvolvidos foram validados de acordo com a bibliografia de referência, tal como por meio de comparação de resultados com softwares comerciais de uso corrente. Ao final do processo de otimização, os resultados obtidos foram comparados a resultados presentes na bibliografia de referência para avaliação da integridade e relevância da metodologia desenvolvida.

1.2. Justificativa

A otimização estrutural é capaz de realizar o dimensionamento de estruturas mais econômicas, o que sempre é almejado em projetos de engenharia. Além disso, uma estrutura de menores custos tende a ser também uma estrutura de menor consumo de recursos naturais, contribuindo para a preservação das reservas destes.

Considerando ainda que trabalhos de otimização visam aprofundar e aprimorar conhecimentos desenvolvidos nas áreas de projeto e análise estrutural, a realização deste tipo de projeto é vital para o desenvolvimento da ciência.

Como a consideração de ligações semirrígidas está atualmente presente na norma europeia EN 1993-1-8 (CEN, 2011), mas ainda ausente nas normas brasileiras, a realização deste trabalho contribui ainda para a disseminação de conhecimentos acerca do tema. A consideração de ligações semirrígidas aumenta a complexidade do

problema, mas constitui uma representação mais realista de esforços e deslocamentos, o que pode contribuir para melhoria de qualidade de resultados.

Um problema de otimização estrutural pode apresentar um grande gasto computacional, dependendo das dimensões da estrutura considerada. Além disso, há ainda o aumento de complexidade trazido pela consideração de ligações viga-pilar semirrígidas, citado anteriormente. Assim, a otimização multinível foi adotada como forma de diminuir as necessidades de recursos computacionais e simplificar o problema geral de otimização.

A plataforma computacional MATLAB® apresenta ferramentas para otimização, incluindo o algoritmo genético disponível no seu conjunto de funções de otimização. Além disso, o módulo computacional de análise estrutural de código aberto CALFEM (Austrell *et al.*, 2004) também foi desenvolvido neste ambiente. Considerando ainda que é possível a concentração de todos os procedimentos em uma única plataforma, propiciando maior eficiência computacional, esta plataforma foi escolhida para o desenvolvimento do trabalho.

O trabalho encontra-se organizado em 7 capítulos que apresentam a introdução, com conceitos básicos, objetivo e justificativa da pesquisa, a revisão bibliográfica, com uma breve explicação dos artigos fundamentais para a elaboração desta pesquisa, úteis para aqueles que buscam se aprofundar no tema proposto, a fundamentação teórica, com explicação dos conceitos mais complexos necessários para compreensão da pesquisa aqui relatada, a metodologia desenvolvida, com explicações sobre o algoritmo de otimização e as considerações de análise utilizadas, os resultados, com os valores obtidos nos processos de otimização de estruturas, tal como discussão de resultados e comparação com a bibliografia de referência, as considerações finais, com uma breve comparação dos resultados e avaliação geral da relevância da pesquisa realizada, e as referências bibliográficas, com todas as informações necessárias para que o autor tenha acessos aos livros e artigos utilizados como base para os conhecimentos aqui apresentados. Há ainda um apêndice em que os módulos computacionais desenvolvidos para realização da pesquisa são devidamente listados e explicados.

2. Revisão Bibliográfica

Há um grande número de trabalhos que abordam total ou parcialmente a temática proposta nesta pesquisa, todos com alguma diferença para o projeto desenvolvido. Este capítulo traz uma lista de tais trabalhos, com uma série de autores que serviram de referência para realização da pesquisa aqui documentada ou que fizeram trabalhos relevantes para a temática abordada podendo, por tanto, ser de interesse dos leitores da presente dissertação.

Simões (1996) realizou a otimização estrutural de pórticos planos em aço com ligações semirrígidas.

Kishi *et al.* (1997) estudaram o comprimento efetivo de elementos submetidos à compressão, tal como determinação do parâmetro de flambagem K , para estruturas que apresentam ligações semirrígidas. Uma série de metodologias de cálculo foram desenvolvidas para uma diversidade de situações específicas.

Chen (2000) desenvolveu um modelo de análise estrutural de estruturas aporticadas planas com ligações semirrígidas através de adaptações das matrizes de rigidez locais dos elementos estruturais. Através de matrizes de correção, através das quais o comportamento semirrígido das ligações é representado nas clássicas matrizes locais de rigidez de elementos estruturais com ligações rígidas, a metodologia viabiliza a realização de análises estruturais lineares e de segundo grau.

Os trabalhos Kameshki e Saka (2001) e Kameshki e Saka (2003) realizaram a otimização de um pórtico por meio do algoritmo genético. O pórtico otimizado por eles considerava ligações semirrígidas, entretanto, ao invés de dimensionar as ligações foram considerados modelos matemáticos para aproximação do comportamento semirrígido destas. A pesquisa de 2001 focou na comparação entre estruturas rígidas e semirrígidas enquanto a pesquisa de 2003 trouxe a consideração de enrijecedores.

Greiner *et al.* (2004) estudaram otimizações de pórticos considerando também problemas multiobjetivo. Foram considerados pórticos de tamanho médio, casos contínuos e discretos, modelos ideais (sem consideração de efeitos de flambagem e cargas gravitacionais próprias) e reais (com ambos). Foram comparadas três

estratégias de algoritmo evolutivo. O estudo apresenta um operador denominado “rebirth”, capaz de acelerar a convergência na otimização de pórticos.

Cabrero e Bayo (2005) desenvolveram uma metodologia de otimização para pórticos planos com ligações semirrígidas. O passo a passo desenvolvido e apresentado por meio de fluxogramas objetiva simplificar o processo de dimensionamento estrutural.

Camp *et al.* (2005) desenvolveram um procedimento para otimizar pórticos por meio do algoritmo de colônia de formigas (ACO). A função objetivo considerada foi o peso total da estrutura, sujeita a restrições de serviço e resistência conforme especificados pelo *American Institute for Steel Construction* (AISC). Os pesquisadores encontraram a configuração ótima de diversos pórticos de múltiplos pavimentos. Também compararam resultados entre os projetos utilizando ACO e os projetos usando um algoritmo genético e métodos clássicos de otimização contínua.

Degertekin e Hayalioglu (2010) realizaram a otimização de pórticos planos em aço com ligações semirrígidas. Além de considerar a semirrígidez em ligações viga-pilar, os autores mantiveram a possibilidade de semirrígidez na ligação entre pilar e fundação. Além disso, utilizaram o algoritmo heurístico Harmony Search, baseado no processo de composição musical, para buscar a solução ótima.

Sakalkar e Hajela (2010) propuseram uma metodologia para realização de otimização multinível para otimização de pórticos. Os pesquisadores desenvolveram, em ambiente MATLAB®, uma forma de otimizar pórticos que apresentem problemas de otimização que se separem em uma organização hierárquica de prioridades. A técnica foi desenvolvida para algoritmos não-determinísticos de otimização.

Díaz *et al.* (2012) desenvolveram uma metodologia para o dimensionamento de ligações semirrígidas metálicas. Com apoio do Eurocode 3 (CEN, 2011) e considerando ligações de chapa de extremidade, foi desenvolvido um passo a passo para esse tipo de procedimento baseado em modelos matemáticos. A inclusão dos modelos matemáticos aproximados permitiu o cálculo da estrutura de forma repetida com menor demanda computacional.

Ramires *et al.* (2012) realizaram a otimização de ligações viga-pilar. A pesquisa em questão considerou ligações viga-pilar em aço e compostas de aço e concreto,

sendo realizada com o auxílio de algoritmos genéticos. O documento trás detalhes da metodologia implementada e os resultados obtidos no processo de otimização, capaz de dimensionar ligações mais econômicas, registrando uma diminuição de até 10% dos custos. O artigo documenta ainda uma comparação entre as ligações realizadas com e sem concreto, constatando uma maior eficiência na resistência de solicitações pelas ligações compostas.

Murren e Khandelwal (2013) apresentaram um novo algoritmo para a otimização de pórticos. Os pesquisadores desenvolveram um algoritmo estocástico (*Design-driven Harmony search* ou DDHS) para a otimização de pórticos. Os resultados obtidos foram comparados com trabalhos anteriores de otimização de pórticos, inclusive trabalhos que utilizavam algoritmos metaheurísticos.

Sánchez-Olivares e Espín (2013) realizaram a otimização de pórticos planos em aço com ligações semirrígidas. O trabalho utilizou algoritmo genético e realizou o dimensionamento de ligações semirrígidas por meio do método das componentes, sendo, dentre as referências bibliográficas, a pesquisa mais próxima da apresentada no presente documento.

Falcón e Montrull (2014) realizaram um estudo para dimensionamento de pórticos de aço com ligações semirrígidas e propuseram o modelo do pórtico auxiliar. Este modelo divide a estrutura em uma sequência de pórticos simples que facilitam o cálculo da rigidez das ligações viga-pilar. Segundo os autores, este modelo possibilitaria a definição de técnicas de otimização multinível.

Leal (2014) analisou os efeitos da não linearidade geométrica na realização de cálculos estruturais de pórticos planos. Pela comparação entre um método matemático e as recomendações apresentadas pela NBR 8800 (ABNT, 2008), o autor constatou que as recomendações normativas são conservadoras, apresentando valores inferiores aos obtidos pelo outro método.

Mosquera e Gargoum (2014) apresentaram um algoritmo para otimização de pórticos. O trabalho foi desenvolvido em ambiente MATLAB® e o dimensionamento foi realizado de acordo com o Eurocode 3. Os resultados foram validados pela comparação com problemas clássicos de otimização de pórticos.

Alberdi e Khandelwal (2015) realizaram um estudo para a comparação de uma série de algoritmos metaheurísticos em problemas de otimização estrutural. Através da aplicação de algoritmos clássicos e modernos em problemas de otimização de pórticos, eles compararam a eficiência dos algoritmos e os classificaram com relação ao seu nível de robustez.

Alberdi *et al.* (2015) realizaram a otimização de uma estrutura aporticada na qual as ligações viga-pilar também eram variáveis. Neste trabalho, um pórtico foi otimizado para o qual os algoritmos de otimização tinham a liberdade de determinar se as ligações viga-pilar eram rígidas ou flexíveis. A otimização foi realizada para 4 algoritmos metaheurísticos diferentes, incluindo o algoritmo genético.

Santos (2016) otimizou pórticos de aço considerando ligações rígidas. Com auxílio do CALFEM (Austrell *et al.*, 2004), programa de análise estrutural desenvolvido em ambiente MATLAB®, e do complemento de otimização do programa, ele criou um programa para otimização de pórticos por meio de algoritmo genético.

Hortencio (2017) apresentou uma metodologia para dimensionamento ótimo de ligações viga-pilar. Baseado nas recomendações normativas do Eurocode 3 (CEN, 2011), ele desenvolveu uma ferramenta computacional para determinação de ligações de chapa de extremidade com o menor custo possível, considerando restrições de resistência e rigidez das ligações. A otimização de resultados também foi realizada com algoritmos genéticos.

Rangel (2018) realizou o dimensionamento ótimo de pórticos planos de aço considerando ligações semirrígidas e análise não-linear. O comportamento semirrígido das ligações foi considerado pela consideração de modelos aproximados. O trabalho utilizou ainda a integração entre o programa de análise estrutural ANSYS® e o programa de otimização MODEFRONTIER®.

Ferreira Júnior (2018) otimizou pórticos planos de aço considerando ligações semirrígidas e análise não-linear. O comportamento semirrígido das ligações foi considerado por modelos aproximados. O processo de otimização foi realizado em ambiente MATLAB® e a análise estrutural foi feita no programa de análise estrutural ANSYS®. Foram desenvolvidos módulos computacionais para integração de ambos programas.

Gil-Martín e Hernández-Montes (2019) formularam um método das componentes modificado para determinação da rigidez de uma ligação semirrígida. Partindo das considerações propostas pela EN 1993-1-8 (CEN, 2011), eles apresentaram um modelo para representação do comportamento semirrígido com cálculos menos complexos, mas que é capaz de representar o problema com boa precisão.

Oliveira (2019) otimizou pórticos de aço considerando ligações semirrígidas. O aspecto semirrígido das ligações foi considerado por meio de elementos finitos de vigas planas e molas. A análise estrutural foi realizada por meio do ANSYS®, enquanto a otimização foi feita com algoritmos genéticos no MATLAB®. A iteração entre os dois programas foi feita por meio de uma plataforma integrada ANSYS®-MATLAB® através de interfaces computacionais.

3. Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta, nos itens subsequentes, os conceitos necessários para pleno entendimento da pesquisa realizada. Para tanto, assume-se um conhecimento básico de engenharia por parte do leitor na explicação de métodos e conceitos.

3.1. Análise Estrutural Não-Linear

É comum utilizar-se, em engenharia civil, de considerações de condições de elasticidade e linearidade na análise estrutural. Esse tipo de consideração prevê que um elemento estrutural trabalhará sempre em regime elástico, com suas tensões e deformações linearmente proporcionais, facilitando os cálculos. A NBR 8800 (ABNT, 2008) faz este tipo de consideração, adotando parâmetros e limites para manter os projetos estruturais na região elástica. A norma brasileira ainda prevê um procedimento para realização de análise de segunda ordem, uma forma de análise estrutural não linear: o método de amplificação dos esforços solicitantes (MAES). Este é capaz apenas de fornecer um valor aproximado (Souza *et al.*, 2019).

A análise não-linear de estruturas considera a presença de não-linearidades físicas e não-linearidades geométricas. A análise não-linear física considera as propriedades dos materiais no comportamento físico da estrutura, observando a relação não-linear entre deformações e tensões quando o limite de elasticidade é ultrapassado. Já a análise não linear geométrica prevê a deformação estrutural devido à aplicação das cargas, levando em consideração a forma deformada da estrutura e seus impactos sobre os cálculos. Para este tipo de problema é necessária a utilização de métodos iterativos, como o método de Newton-Raphson (Souza *et al.*, 2019).

O método de Newton-Raphson subdivide a força total aplicada em incrementos de carga intercalados aos procedimentos de análise estrutural. Dessa maneira, é possível obter as deformações geradas por cada incremento, levando as alterações geométricas em consideração no passo posterior. Além do método de Newton-

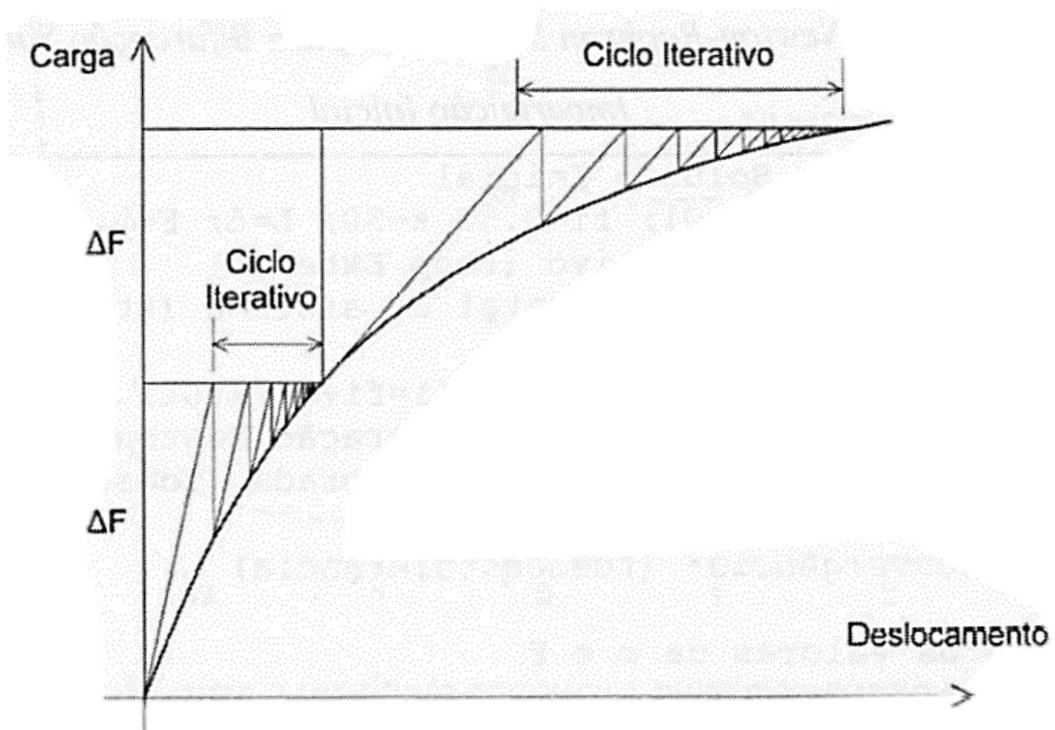
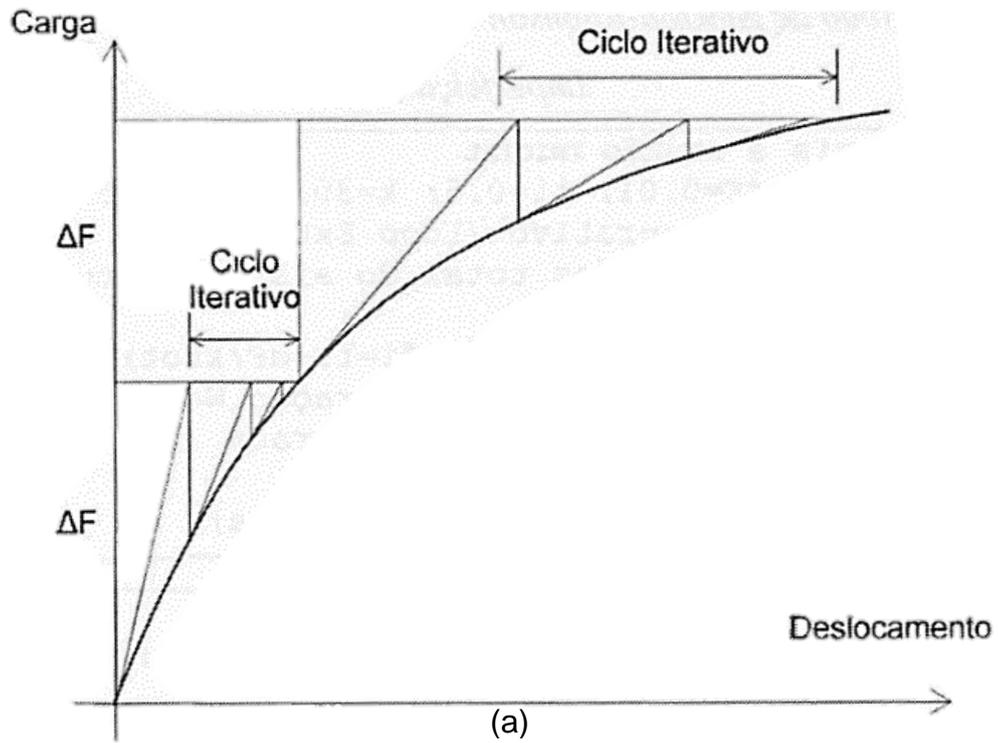
Raphson padrão, também é comum a utilização do método de Newton-Raphson modificado.

No método de Newton-Raphson padrão, busca-se o deslocamento correspondente a um incremento de força ΔF por meio de um ciclo iterativo. Neste ciclo iterativo, para cada iteração, uma função diferencial fornece uma reta tangente ao ponto da curva tensão-deformação no qual a iteração iniciou-se. No ponto em que esta equação de reta alcança a força F , correspondente a força total aplicada ao sistema até esta iteração, é calculado um novo deslocamento, o procedimento é repetido até que os esforços e deslocamentos sejam compatíveis dentro de uma tolerância estabelecida pelo usuário.

O método de Newton-Raphson modificado assemelha-se muito ao método padrão. A diferença entre eles é que, em cada iteração de um ciclo iterativo, ao invés de utilizar a reta tangente do ponto da curva tensão-deformação onde se iniciou cada iteração, o método utiliza a reta tangente do ponto inicial do ciclo iterativo para todas as iterações.

Ambos os métodos podem ser observados na Figura 3.1, que apresenta representações gráficas do funcionamento destes.

Vale notar que em cada ciclo iterativo uma série de análises estruturais de caráter linear é realizada, demonstrando o alto consumo computacional e complexidade característicos da análise estrutural não-linear. A velocidade de convergência desses métodos varia em cada caso, sendo a escolha de que método utilizar passível da avaliação do usuário.



(b)

Figura 3.1: Representação dos métodos de Newton-Raphson (a) e Newton-Raphson Modificado (b) (Souza *et al.*, 2019).

3.2. Ligações Semirrígidas

As ligações viga-pilar são significativas para a determinação do comportamento de uma estrutura apertada. De forma geral, a engenharia tradicional tende a considerar ligações deste tipo como rígidas ou flexíveis. No entanto, a realidade é que as estruturas, de forma geral, apresentam um padrão de comportamento que se encontra entre essas duas considerações. Experimentos demonstram que, ao se aplicar um momento em uma ligação semirrígida, a rotação relativa entre a viga e a coluna apresenta um comportamento não-linear. Essa rotação ocasiona ainda uma redistribuição de esforços entre os elementos. Assim, ao se realizar estudos associados à análise estrutural, a modelagem de uma ligação como semirrígida pode ser fundamental para correta interpretação de resultados (Kameshki e Saka, 2001).

A NBR 8800 (ABNT, 2008) estipula que uma ligação pode ser considerada como flexível se obedecer à equação (1):

$$S_{ini} \leq 0,5 E \frac{I_v}{L_v} \quad (1)$$

Sendo:

S_{ini} – Coeficiente de rigidez inicial da ligação;

E – Módulo de elasticidade longitudinal do aço;

I_v – Momento de inércia da seção transversal da viga;

L_v – Comprimento da viga.

Em pórticos deslocáveis, uma ligação rígida, por sua vez, é normativamente classificada como aquela capaz de atender as equações (2) e (3):

$$S_{ini} \geq 25 E \frac{I_v}{L_v} \quad (2)$$

$$\frac{k_v}{k_p} \geq 0,1 \quad (3)$$

Onde:

k_v – Valor médio de I_v/L_v para todas as vigas do topo do andar, com I_v e L_v definidos conforme na equação (1);

k_p – Valor médio de I_p/L_p para todos os pilares no topo do andar;

I_p – Momento de inércia de um pilar no plano da estrutura;

L_p – Altura do andar para um pilar.

Essa classificação é a mesma adotada pela norma europeia EN 1993-1-8 (CEN, 2011). Ela é ilustrada na Figura 3.2, que mostra as regiões do gráfico de momento por rotação para as quais as estruturas são classificadas como rígidas, semirrígidas ou flexíveis.

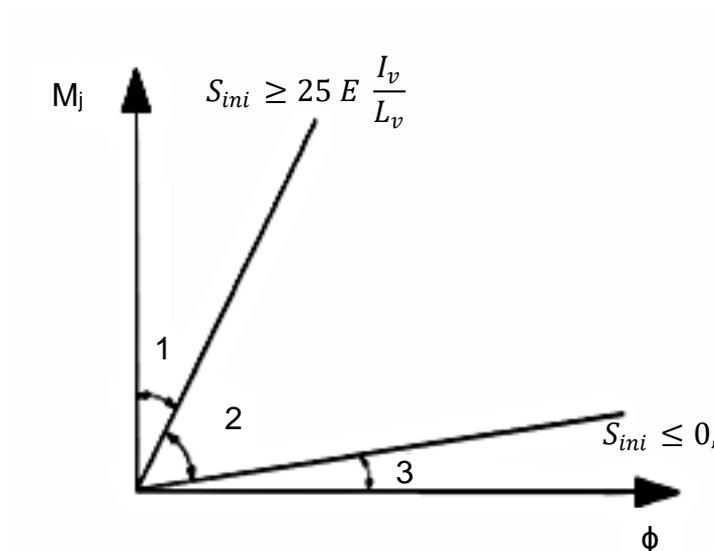


Figura 3.2: Gráfico de momento x rotação de ligações viga-pilar com classificação de ligações flexíveis (3), semirrígidas (2) e rígidas (1) (CEN, 2011).

Assim, conforme ilustrado na Figura 3.2, uma ligação semirrígida pode ser classificada, para pórticos deslocáveis, pela equação (4):

$$25 E \frac{I_v}{L_v} \geq S_{ini} \geq 0,5 E \frac{I_v}{L_v} \quad (4)$$

Em que todos os parâmetros estão anteriormente definidos nas equações (1) e (2).

O EN 1993-1-8 (CEN, 2011) fornece ainda um método para o dimensionamento de ligações metálicas semirrígidas.

3.3.Método das Componentes

A norma europeia EN 1993-1-8 (CEN, 2011) apresenta o Método das Componentes como metodologia de dimensionamento de ligações semirrígidas. Com isto, essa metodologia ganhou espaço no dimensionamento estrutural e em pesquisas científicas. Nela, considera-se a separação das componentes de uma ligação viga-pilar com relação às suas componentes ativas, isto é, diferentes pontos em que podem ser observadas tensão e deformação decorrentes da solicitação das ligações viga-pilar. A Figura 3.3 apresenta essas possíveis componentes ativas para uma ligação de chapa de extremidade.

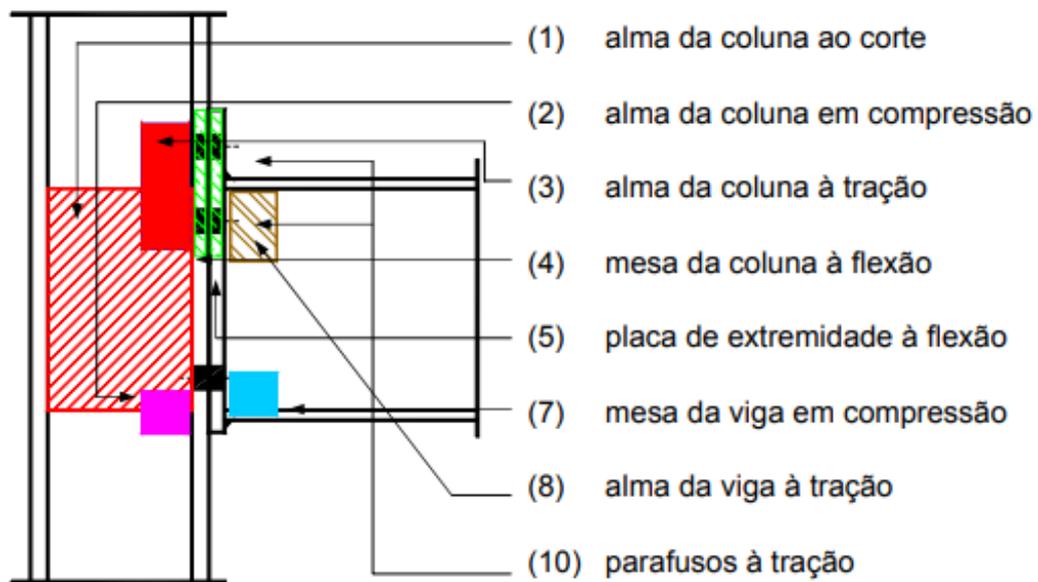


Figura 3.3: Possíveis componentes ativas no método das componentes (Lima, 2003).

Com as componentes identificadas, é possível calcular o coeficiente de rigidez de cada uma e montar um sistema de molas conforme o demonstrado na Figura 3.4, capaz de simular um comportamento muito próximo da realidade (Faella *et al.*, 2000).

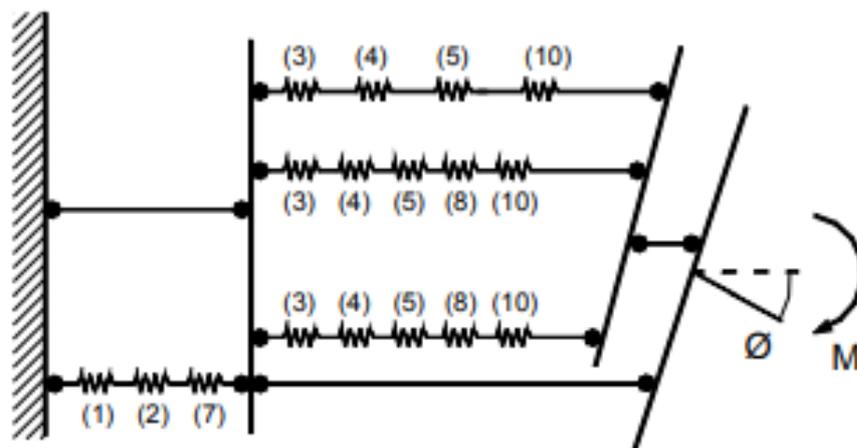


Figura 3.4: Modelo para simulação do comportamento de ligações semirrígidas (Lima, 2003).

As influências das componentes podem assim ser somadas, manifestando resultados muito próximos aos resultados da estrutura real (Lima, 2003).

Atualmente, apenas ligações soldadas, com ligações com cantoneira de topo e de apoio e ligações com placas de extremidade são consideradas pela EN 1993-1-8 (CEN, 2011). Todavia, suas considerações são gerais suficientes para serem utilizadas em uma gama muito maior de ligações. A norma utiliza-se do cálculo dos coeficientes de rigidez das componentes para a determinação da rigidez rotacional S_j das ligações semirrígidas. A norma exige que os coeficientes de rigidez rotacional sejam utilizados na análise estrutural caso haja ligações semirrígidas.

Para o cálculo da rigidez rotacional das ligações viga-pilar parafusadas com chapa de extremidade, a metodologia estabelecida pela norma EN 1993-1-8 (CEN, 2011) requer o cálculo dos coeficientes de rigidez associados às componentes (1), (2), (3), (4), (5) e (10) apresentadas na Figura 3.3. A metodologia de cálculo desses valores é apresentada nas seções subsequentes deste capítulo.

3.3.1. Componente 1 – Alma da coluna ao corte

A componente k_1 , relativa à alma da coluna submetida à esforço cortante é calculada de acordo com a equação (5).

$$k_1 = \frac{0,38 A_{vc}}{\beta z} \quad (5)$$

Onde:

A_{vc} – Área de corte da seção do pilar;

β – Parâmetro de transformação;

z – Distância entre o centro da área tracionada e da área comprimida da mesa da coluna.

3.3.2. Componente 2 – Alma da coluna em compressão

A componente k_2 relativa à alma da coluna submetida à compressão é calculada de acordo com a equação (6).

$$k_2 = \frac{0,7 b_{eff,c,wc} t_{wc}}{d_c} \quad (6)$$

Sendo:

$b_{eff,c,wc}$ – Largura efetiva à compressão da coluna;

d_c – Profundidade da alma da coluna;

t_{wc} – Largura da alma da viga.

3.3.3. Componente 3 – Alma da coluna à tração

A componente k_3 relativa à alma da coluna submetida à esforço trativo é calculada de acordo com a equação (7).

$$k_3 = \frac{0,7 b_{eff,t,wc} t_{wc}}{d_c} \quad (7)$$

Em que $b_{eff,t,wc}$ é a largura efetiva da coluna à tração.

3.3.4. Componente 4 – Mesa da coluna à flexão

A componente k_4 relativa à mesa da coluna submetida à flexão é calculada de acordo com a equação (8).

$$k_4 = \frac{0,9 l_{eff} t_{fc}^3}{m^3} \quad (8)$$

Onde:

l_{eff} – Menor comprimento efetivo da fileira de parafusos (entre o calculado individualmente e o calculado para um grupo de parafusos);

t_{fc} – Grossura da mesa da coluna;

m – Dimensão geométrica da ligação realizada, obtida conforme demonstrado na Figura 3.5.

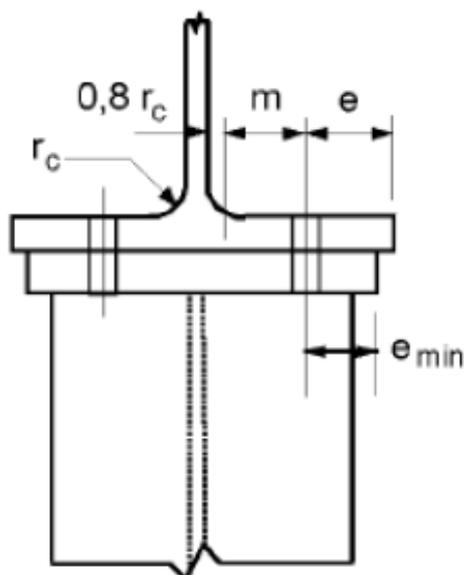


Figura 3.5: Definição de parâmetros geométricos de ligações parafusadas. (CEN, 2011)

3.3.5. Componente 5 – Placa de extremidade à flexão

A componente k_5 relativa à placa de extremidade submetida à flexão é calculada de acordo com a equação (9).

$$k_5 = \frac{0,9 l_{eff} t_p^3}{m^3} \quad (9)$$

Em que t_p é a espessura da chapa na qual estão fixos os parafusos.

3.3.6. Componente 10 – Parafusos à tração

A componente k_{10} relativa à parafusos submetidos à tração é calculada de acordo com a equação (10).

$$k_{10} = \frac{1,6 A_s}{L_b} \quad (10)$$

Sendo:

A_s – Área da seção do parafuso;

L_b – Dimensão obtida pela soma da distância total entre a cabeça e a porca do parafuso com metade da espessura da cabeça e da porca.

3.3.7. Rigidez de Ligações Semirrígidas

Com as componentes determinadas, conforme a EN 1993-1-8 (CEN, 2011), é possível calcular a rigidez da ligação semirrígida. Para estruturas que apresentem este tipo de ligação, a norma estabelece que este parâmetro deve ser devidamente calculado e levado em conta na análise estrutural.

Para ligações semirrígidas com apenas uma fileira de parafusos trabalhando à tração, a rigidez pode ser calculada de acordo com a equação (11):

$$S_j = \frac{E z^2}{\mu \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}} \right)} \quad (11)$$

Em que:

E – Módulo de elasticidade;

z – Distância entre o centro da região comprimida e a fileira de parafusos tracionados;

μ – Razão entre a rigidez inicial $S_{j,ini}$ e a rigidez S_j .

Pode-se calcular a rigidez inicial da ligação adotando $\mu = 1$ na equação (11). O valor de μ também pode ser definido através da relação entre o momento solicitante $M_{j,Sd}$ e o resistente $M_{j,Rd}$ (calculado conforme a norma europeia).

Se o momento solicitante for menor do que 2/3 do momento resistente da ligação, pode-se considerar que $\mu = 1$, situação para a qual $S_{j,ini} = S_j$. Caso contrário, o parâmetro deve ser calculado conforme a equação (12):

$$\mu = \left(1,5 \frac{M_{j,Sd}}{M_{j,Rd}} \right)^\psi \quad (12)$$

Em que ψ vale 3,1 para ligações com cantoneira de topo e de apoio e 2,7 para as demais ligações.

Caso haja mais de uma fileira de parafusos trabalhando à tração, a rigidez passa a ser determinada através da equação (13):

$$S_j = \frac{E z^2}{\mu \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_{eq}} \right)} \quad (13)$$

Sendo k_{eq} um coeficiente equivalente de rigidez, calculado a partir da equação (14):

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r}{z_{eq}} \quad (14)$$

Em que:

h_r – Distância entre a fileira r de parafusos e o centro da área comprimida;

z_{eq} – Braço de alavanca equivalente, calculado conforme a equação (15);

$k_{eff,r}$ – Coeficiente de rigidez efetivo para a fileira r de parafusos, calculado conforme a equação (16).

$$z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} h_r} \quad (15)$$

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_r \left(\frac{1}{k_{3,r}} + \frac{1}{k_{4,r}} + \frac{1}{k_{5,r}} + \frac{1}{k_{10,r}} \right)} \quad (16)$$

Em que $k_{3,r}$, $k_{4,r}$, $k_{5,r}$ e $k_{10,r}$ são, respectivamente, os valores de k_3 , k_4 , k_5 e k_{10} para a fileira r de parafusos.

3.4. Análise Estrutural de Pórticos com Ligações Semirrígidas

Embora a utilização de uma ligação viga-pilar com comportamento completamente rígido ou completamente flexível seja improvável no campo prático, essa é uma consideração muito comum na análise estrutural. Tendo em mente o acréscimo de trabalho originado pela consideração de ligações semirrígidas, os profissionais tendem a realizar tais aproximações e projetar posteriormente a ligação que melhor se aproxime dos comportamentos idealizados. Todavia, tal medida pode ocasionar na realização de estruturas mais custosas, o que motiva a consideração de ligações semirrígidas em trabalhos como este.

Existem dois modelos comumente adotados para considerar as ligações semirrígidas na análise estrutural. O primeiro consiste na utilização de mecanismos para representar as ligações semirrígidas, adicionando-os aos modelos clássicos de análise estrutural como elementos estruturais. O problema desta abordagem é a adoção de novos elementos que podem resultar em uma demanda computacional maior, além das dificuldades associadas à interpretação de dados físicos neste modelo, considerando que os elementos da ligação são autônomos e não são considerados como ligados às extremidades das vigas. O segundo modelo representa as ligações viga-pilar como sendo molas embutidas nas extremidades dos elementos estruturais. Desta maneira, cada elemento da estrutura passa a ser representado por um elemento finito com dois elementos de mola de dimensões desprezíveis em suas extremidades (Chen, 2000). A Figura 3.6 representa um elemento estrutural submetido às considerações deste modelo.



Figura 3.6: Elemento com ligações semirrígidas (Chen, 2000).

Na Figura 3.6 o elemento de barra possui três graus de liberdade e um elemento de mola em cada uma de suas extremidades. Este elemento de mola possui um valor de rigidez rotacional que representa a rigidez da ligação viga-pilar da extremidade correspondente. A consideração de elementos de mola nas extremidades do elemento finito causa uma modificação na distribuição de esforços. Nesta situação, uma carga linearmente distribuída na viga ocasionaria a aparição de momentos fletores M_1 e M_2 nas extremidades do elemento que podem ser calculados pelas equações (17) e (18).

$$M_1 = \frac{qL^2}{12} \left[\frac{3r_1(2 - r_2)}{4 - r_1r_2} \right] \quad (17)$$

$$M_2 = -\frac{qL^2}{12} \left[\frac{3r_2(2 - r_1)}{4 - r_1r_2} \right] \quad (18)$$

Sendo:

q – Intensidade da carga distribuída;

L – Comprimento do elemento finito;

r_i – Fator de rigidez da extremidade i , calculado conforme a equação (19):

$$r_i = -\frac{1}{1 + \frac{3EI}{S_{j,ini,i}L}} \quad i = 1,2 \quad (19)$$

Em que:

E – Módulo de elasticidade do elemento finito;

I – Momento de inércia do elemento finito;

$S_{j,ini,i}$ – Rigidez inicial da ligação da extremidade i do elemento finito.

Os itens subsequentes apresentam o modelo proposto para análise estrutural de pórticos planos com ligações semirrígidas para casos de análise linear (3.4.1) e análise não-linear (3.4.2).

3.4.1. Análise Linear

Considere a matriz de rigidez S de um elemento finito com ligações rígidas em ambas as extremidades:

$$S = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}$$

Para um elemento estrutural como o representado na Figura 3.6, pode-se dizer que o valor da matriz de rigidez K do elemento finito pode ser obtida através da equação (20) (Chen, 2000).

$$K = S \cdot C \quad (20)$$

Em que C é uma matriz de correção capaz de representar a rigidez das ligações viga-pilar, calculados a partir dos valores das rigidezes rotacionais das molas nas extremidades da viga. A matriz C pode ser obtida através do desenvolvimento do seguinte conjunto de equações:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c & d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e & f \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c & g \end{bmatrix}$$

Sendo:

$$a = \frac{4r_2 - 2r_1 + r_1r_2}{4 - r_1r_2} \quad (21)$$

$$b = \frac{-2Lr_1(1 - r_2)}{4 - r_1r_2} \quad (22)$$

$$c = \frac{6(r_1 - r_2)}{L(4 - r_1r_2)} \quad (23)$$

$$d = \frac{3r_1(2 - r_2)}{4 - r_1r_2} \quad (24)$$

$$e = \frac{4r_1 - 2r_2 + r_1r_2}{4 - r_1r_2} \quad (25)$$

$$f = \frac{2Lr_2(1 - r_1)}{4 - r_1r_2} \quad (26)$$

$$g = \frac{3r_2(2 - r_1)}{4 - r_1r_2} \quad (27)$$

Em que r_1 e r_2 são calculados pela equação (19).

3.4.2. Análise não-linear

Para um elemento estrutural como o representado na Figura 3.6, o valor da matriz de rigidez K em uma análise estrutural de segunda ordem pode ser obtida através da equação (28) (Chen, 2000).

$$K = S \cdot C + G \quad (28)$$

Pode-se observar que a equação (28) compartilha forte semelhança com a equação (20). De fato, a única diferença entre elas é a inclusão da matriz de rigidez geométrica de segunda ordem G , responsável por considerar a influência dos deslocamentos no problema de análise estrutural (Chen, 2000). A matriz G pode ser desenvolvida por meio do seguinte conjunto de equações:

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_{22} & G_{23} & 0 & G_{25} & G_{26} \\ 0 & G_{23} & G_{33} & 0 & G_{35} & G_{36} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_{25} & G_{35} & 0 & G_{55} & G_{56} \\ 0 & G_{26} & G_{36} & 0 & G_{56} & G_{66} \end{bmatrix}$$

Em que:

$$G_{22} = \frac{2N}{5L(4 - r_1 r_2)^2} (3r_1^2 r_2^2 + r_1^2 r_2 + r_1 r_2^2 + 8r_1^2 + 8r_2^2 - 34r_1 r_2 + 40) \quad (29)$$

$$G_{23} = \frac{N}{10(4 - r_1 r_2)^2} (3r_1^2 r_2^2 - 12r_1^2 r_2 + 16r_1 r_2^2 - 28r_1 r_2 + 32r_1^2) \quad (30)$$

$$G_{33} = \frac{2NL}{5(4 - r_1 r_2)^2} (2r_1^2 r_2^2 - 7r_1^2 r_2 + 8r_1^2) \quad (31)$$

$$G_{36} = \frac{-NL}{10(4 - r_1 r_2)^2} (7r_1^2 r_2^2 - 16r_1^2 r_2 - 16r_1 r_2^2 + 28r_1 r_2) \quad (32)$$

$$G_{26} = \frac{N}{10(4 - r_1 r_2)^2} (r_1^2 r_2^2 - 16r_1^2 r_2 - 12r_1 r_2^2 - 28r_1 r_2 + 32r_2^2) \quad (33)$$

$$G_{66} = \frac{2NL}{5(4 - r_1 r_2)^2} (2r_1^2 r_2^2 - 7r_1 r_2^2 + 8r_2^2) \quad (34)$$

$$G_{55} = G_{22} \quad (35)$$

$$G_{25} = -G_{22} \quad (36)$$

$$G_{35} = -G_{23} \quad (37)$$

$$G_{56} = -G_{26} \quad (38)$$

Sendo:

N – Esforço normal ao qual o elemento finito está submetido;

L – Comprimento do elemento finito;

r_1 e r_2 são calculados conforme a equação (19).

3.5. Dimensionamento de pórticos planos em aço

Uma vez realizada a análise estrutural de uma determinada estrutura, o engenheiro é responsável por calcular os esforços resistentes de seus elementos. Começa aí o processo conhecido como dimensionamento estrutural, em que o profissional deve garantir que para todos os elementos estruturais, o esforço resistente seja superior ao esforço solicitante. O cálculo do esforço resistente dos elementos que compõem um pórtico pode ser feito através das várias técnicas e teorias cientificamente comprovadas, em grande parte presentes nas diferentes normas utilizadas ao redor do mundo. Esta seção pretende explicar os cálculos necessários para realização do dimensionamento estrutural de pórticos em aço de acordo com a norma brasileira NBR 8800 (ABNT, 2008).

Como os elementos de estruturas apertadas normalmente trabalham em compressão, os itens subsequentes tem ênfase neste tipo de esforço, em momentos fletores e na interação entre ambos, tal como em todos os cálculos necessários para obtenção dos valores de resistência. Vale ressaltar que, devido à natureza do trabalho proposto, os subitens deste capítulo são aplicáveis a elementos com seções transversais do tipo I, H ou U fletidos em relação ao eixo de maior momento de inércia.

3.5.1. Elementos submetidos à compressão axial

Para garantir que um elemento de aço submetido à esforços compressivos não sofra flambagem é necessário que o esforço normal resistente deste seja maior ou igual ao esforço normal solicitante, conforme a equação (39).

$$N_{Sd} \leq N_{Rd} \quad (39)$$

A equação (39) deve ser verificada com o esforço normal resistente N_{Rd} calculado conforme a equação (40) fornecida pela norma brasileira NBR 8800 (ABNT, 2008).

$$N_{Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (40)$$

Onde:

A_g – Área bruta da seção transversal da barra;

f_y – Tensão de escoamento do aço;

γ_{a1} – Coeficiente de segurança igual a 1,10;

Q – Fator de redução total associado à flambagem local, obtido conforme o subitem 3.5.1.1;

χ – Fator de redução associado à resistência à compressão, dado pelas equações (41) e (42).

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad \text{para } \lambda_0 \leq 1,5 \quad (41)$$

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad \text{para } \lambda_0 > 1,5 \quad (42)$$

Em que λ_0 é o índice de esbeltez reduzido dado pela equação (43).

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (43)$$

Sendo N_e é a força axial de flambagem elástica dada pela equação (44).

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (44)$$

Sendo I o momento de inércia da seção comprimida e K o coeficiente de flambagem, melhor explicado no subitem 3.5.1.2.

3.5.1.1. Fator de redução Q

Considerando b_a como a altura da alma do elemento comprimido, t_a como a espessura da alma do elemento comprimido, b_s como a largura da mesa do elemento comprimido e t_s como a altura da mesa do elemento comprimido, temos Q determinado conforme a equação (45).

$$Q = 1 \quad \text{para} \quad \frac{b_a}{t_a} < \frac{b_a}{t_{a\lim}} \quad \& \quad \frac{b_s}{t_s} < \frac{b_s}{t_{s\lim}} \quad (45)$$

Em que, para os elementos considerados:

$$\frac{b_a}{t_{a\lim}} = 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (46)$$

$$\frac{b_s}{t_{s\lim}} = 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (47)$$

Sendo E é o módulo de elasticidade do aço e f_y é a tensão de escoamento do aço.

Caso a equação (45) não seja atendida, o fator de redução Q associado à flambagem local passa a ser obtido através da equação (48).

$$Q = Q_a + Q_s \quad (48)$$

Em que Q_a é o fator de redução que leva em conta a flambagem local da alma e Q_s é o fator de redução que leva em conta a flambagem local da mesa. Estes fatores podem ser calculados de acordo com as equações (49), (50) e (51).

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \frac{b_s}{t_s} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad \text{para} \quad 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b_s}{t_s} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (49)$$

$$Q_s = \frac{0,69E}{f_y \left(\frac{b_s}{t_s}\right)^2} \quad \text{para} \quad \frac{b_s}{t_s} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (50)$$

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} \quad (51)$$

Em que A_g é a área bruta da seção transversal do elemento comprimido e A_{ef} é a área efetiva da seção transversal do elemento calculada conforme a equação (52).

$$A_{ef} = A_g - \sum (b_a - b_{ef}) t_a \quad (52)$$

Sendo b_{ef} é a largura efetiva das mesas do elemento comprimido, calculada conforme a equação (53).

$$b_{ef} = 1,92t_a \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \left[1 - \frac{0,34}{b_a/t_a} \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right] \leq b_a \quad (53)$$

Em que σ é calculado conforme a equação (54).

$$\sigma = \chi f_y \quad (54)$$

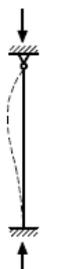
Sendo χ calculado conforme as equações (41) e (42) com o índice de esbeltez λ_0 proveniente da equação (55) ao invés da equação (43).

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g f_y}{N_e}} \quad (55)$$

3.5.1.2. Coeficiente de Flambagem K

Existem muitas maneiras diferentes de se calcular o coeficiente de flambagem. A norma brasileira de construção em aço NBR 8800 (ABNT, 2008) possibilita a determinação dos valores teóricos do coeficiente K , para elementos estruturais com translação e rotação das extremidades totalmente livres ou totalmente impedidos, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 3.1: Valores do coeficiente de flambagem K segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008)

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio	 Rotação e translação impedidas  Rotação livre, translação impedida  Rotação impedida, translação livre  Rotação e translação livres					

Embora apresente valores válidos, a Tabela 3.1 falha em fornecer valores de coeficiente de flambagem para os casos associados às ligações semirrígidas e estabelecer a influência destas no comprimento efetivo das estruturas.

Kishi *et al.* (1997) estabelecem que o coeficiente de flambagem pode ser obtido através da resolução da equação (56) quando as colunas se encontram rigidamente conectadas entre si.

$$\frac{G_A' G_B' (\pi/K)^2 - 36}{6(G_A' + G_B')} - \frac{(\pi/K)}{\tan(\pi/K)} = 0 \quad (56)$$

Onde G_A' e G_B' são os fatores de rigidez das extremidades A e B , respectivamente, do elemento comprimido e podem ser calculados de acordo com as equações (57) e (58).

$$G_A' = \frac{\sum_A \left(\frac{EI}{L}\right)_c}{\sum_A \alpha_{uf} \left(\frac{EI}{L}\right)_v} \quad (57)$$

$$G_B' = \frac{\sum_B \left(\frac{EI}{L}\right)_c}{\sum_B \alpha_{uf} \left(\frac{EI}{L}\right)_v} \quad (58)$$

Sendo A e B as extremidades do elemento comprimido, c e v correspondentes a coluna e viga, respectivamente, e α_{uf} obtido através da Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Valores do coeficiente α_{uf} segundo Kishi *et al.* (1997)

Ligações		α_{uf}
Extremidade A	Extremidade B	
Rígido	Rígido	1
Rígido	Flexível	1/2
Rígido	Semirrígido	$\left(1 + \frac{2EI_v}{L_v R_B}\right) / \left(1 + \frac{4EI_v}{L_v R_B}\right)$
Semirrígido	Rígido	$1 / \left(1 + \frac{4EI_v}{L_v R_A}\right)$
Semirrígido	Flexível	$(1/2) / \left(1 + \frac{3EI_v}{L_v R_A}\right)$
Semirrígido	Semirrígido	$\left(1 + \frac{2EI_v}{L_v R_B}\right) / R^*$

$$R^* = \left(1 + \frac{4EI_v}{L_v R_A}\right) \left(1 + \frac{4EI_v}{L_v R_B}\right) - \left(\frac{EI_v}{L_v}\right)^2 \frac{4}{R_A R_B}$$

3.5.2. Elementos submetidos a momento fletor

Um elemento exposto à influência de um momento fletor mantém-se íntegro se o esforço solicitante M_{Sd} for menor ou igual ao esforço resistente M_{Rd} , conforme a equação (59).

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (59)$$

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), o momento resistente de cálculo M_{Rd} deve ser determinado de acordo com três Estados Limites: o Estado Limite de Flambagem Local da Alma (FLA), o Estado Limite de Flambagem Local da Mesa Comprimida (FLM) e o Estado Limite de Flambagem Lateral com Torção (FLT). A determinação do momento resistente em cada um dos casos depende da comparação entre o parâmetro de esbeltez λ , o parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação λ_p e o parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento λ_r . Uma vez calculado em cada situação, o M_{Rd} escolhido deve ser o menor dos valores encontrados. O procedimento para determinação dos momentos resistentes em cada um dos Estados Limite encontra-se explicado nos subitens 3.5.2.1, 3.5.2.2 e 3.5.2.3.

3.5.2.1. Estado Limite FLA

Para o Estado Limite FLA tem-se os parâmetros de esbeltez calculados conforme as equações (60), (61) e (62).

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (60)$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (61)$$

$$\lambda_r = 5,7 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (62)$$

Em que h é a altura da alma do perfil, t_w é a largura da alma do perfil, E é o módulo de elasticidade do aço e f_y é a tensão de escoamento do aço.

O momento fletor resistente M_{Rd} desse Estado Limite é calculado conforme a equação (63) quando $\lambda \leq \lambda_p$ e conforme a equação (64) para valores de λ maiores que λ_p e menores ou iguais à λ_r .

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad \text{para } \lambda \leq \lambda_p \quad (63)$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \quad \text{para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (64)$$

Em que γ_{a1} é um coeficiente de segurança que vale 1,10, M_{pl} é o momento fletor de plastificação, calculado conforme a equação (65), e M_r é o momento fletor correspondente ao início do escoamento, calculado conforme a equação (66).

$$M_{pl} = Z * f_y \quad (65)$$

Sendo Z é o módulo de resistência plástica da seção, relativo ao eixo fletido.

$$M_r = (f_y - \sigma_r)W \quad (66)$$

Em que W é o módulo de resistência elástica da seção, relativo ao eixo fletido, e σ_r é a tensão residual de compressão nas mesas, tomado como 30% da tensão de escoamento do aço utilizado (ABNT, 2008).

3.5.2.2. Estado Limite FLM

Para o Estado Limite FLM temos os parâmetros de esbeltez calculados conforme as equações (67), (68) e (69).

$$\lambda = \frac{b}{t} \quad (67)$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (68)$$

$$\lambda_r = 0,83 * \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}} \quad (69)$$

Em que b é a largura da mesa da seção, t é a altura da mesa da seção e σ_r é a tensão residual de compressão nas mesas.

O momento fletor resistente M_{rd} desse Estado Limite é calculado conforme a equação (63) quando $\lambda \leq \lambda_p$, conforme a equação (64) para valores de λ maiores que λ_p e menores ou iguais à λ_r e conforme a equação (70) quando $\lambda > \lambda_r$.

$$M_{rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \quad \text{para } \lambda > \lambda_r \quad (70)$$

Sendo M_{cr} é o momento fletor de flambagem elástica, calculado conforme a equação (71).

$$M_{cr} = \frac{C_b * \pi^2 * E * I}{L^2} \sqrt{\frac{C_w}{I} \left(1 + 0,039 \frac{J * L^2}{C_w} \right)} \quad (71)$$

Em que:

C_w – Constante de empenamento da seção transversal, calculada conforme a equação (72);

L – Comprimento destravado do elemento fletido;

J – Constante de torção da seção transversal;

C_b – Fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme, calculado conforme a equação (73).

$$C_w = \frac{I(d - t)^2}{4} \quad (72)$$

Sendo d a altura da seção transversal.

$$C_b = \frac{12,5 M_{max}}{2,5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} \leq 3,0 \quad (73)$$

Em que:

M_{max} – Momento fletor máximo solicitante de cálculo, em módulo;

M_A – Momento fletor solicitante atuante na seção a 1/4 do comprimento, em módulo;

M_B – Momento fletor solicitante atuante na seção média do comprimento, em módulo;

M_C – Momento fletor solicitante atuante na seção a 3/4 do comprimento, em módulo.

3.5.2.3. Estado Limite FLT

Para o Estado Limite FLT os parâmetros de esbeltez são calculados conforme as equações (74), (75) e (76).

$$\lambda = \frac{L}{r} \quad (74)$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (75)$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 * \sqrt{I * J}}{r * J * \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 * C_w * \beta_1^2}{I}}} \quad (76)$$

Onde r é o raio de giração da seção transversal em torno do eixo fletido, C_w é o fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme calculado conforme a equação (72), J é a constante de torção pura calculada de acordo com a equação (77) (Pfeil e Pfeil, 2009) e β_1 é um parâmetro calculado de acordo com a equação (78).

$$J = \frac{1}{3}(2b t^3 + h t_w^3) \quad (77)$$

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W}{E * J} \quad (78)$$

3.5.3.Elementos submetidos a flexo-compressão

A NBR 8800 (ABNT, 2008) prevê verificações específicas para situações em que um elemento prismático esteja submetido à esforços normais e momentos fletores de forma simultânea. Nestes casos, os limites estabelecidos pelas equações (79) e (80) devem ser obedecidos, conforme sejam aplicáveis.

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8 M_{Sd}}{9 M_{Rd}} \leq 1 \quad \text{para} \quad \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2 \quad (79)$$

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1 \quad \text{para} \quad \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2 \quad (80)$$

3.5.4.Limitação do índice de esbeltez

A norma para construção em aço NBR 8800 (ABNT, 2008) determina que os elementos estruturais comprimidos ou tracionados devem ser limitados quanto ao índice de esbeltez de acordo com a equação (81).

$$\frac{KL}{r} \leq \lambda_{lim} \quad (81)$$

Sendo:

K – Coeficiente de flambagem calculado conforme o item 3.5.1.2;

L – Comprimento destravado do elemento;

r – Raio de giração da seção transversal;

λ_{lim} – Limite da relação igual a 200 para peças comprimidas e 300 para peças tracionadas.

3.5.5.Deslocamentos máximos

Os deslocamentos máximos estabelecidos pela NBR 8800 (ABNT, 2008) para a flechas de vigas e deslocamentos horizontais para algumas situações estruturais encontra-se na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Limites de ELS segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008)

Elemento estrutural		Limite de deslocamento
Vigas de cobertura		L/250
Vigas de piso		L/350
Edifícios de dois ou mais pavimentos	Deslocamento horizontal do topo dos pilares até a base	H/400
	Deslocamento relativo entre dois pisos consecutivos	h/500

Em que L corresponde ao comprimento destravado da viga, H corresponde à altura da edificação e h corresponde à altura entre dois pisos consecutivos.

Além das considerações estabelecidas na Tabela 3.3, a NBR 8800 (ABNT, 2008) também define que a flecha não deve ser maior que 15 mm em vigas imediatamente acima ou abaixo de paredes de alvenaria.

3.6. Otimização Estrutural

A otimização de um projeto consiste na utilização de métodos racionais, normalmente matemáticos, na busca de uma solução mais eficiente para um problema proposto que apresente um ou mais parâmetros.

Um problema de otimização deve apresentar variáveis de projeto, capazes de corresponder às características que influenciam o problema em questão e que podem ser modificadas. Essas variáveis podem ser contínuas ou discretas. As variáveis contínuas podem assumir qualquer valor real dentro ou não de um intervalo de valores máximos e mínimos. As variáveis discretas, por sua vez, só podem assumir alguns valores específicos.

Além disso, um problema de otimização deve apresentar uma função objetivo, cuja maximização ou minimização de valor do resultado representa uma melhoria da solução do problema proposto, e funções de restrição, capazes de limitar a variação da variável dentro do campo de possibilidades do problema. Seja através da maximização ou minimização de uma função objetivo e considerando restrições de projeto, a otimização busca um aumento de eficiência na administração de processos e/ou recursos.

Qualquer sistema pode ser formulado de forma a buscar melhorias de determinados parâmetros com respeito aos limites e restrições dos ditos sistemas. Este processo de adaptação de um sistema real a um modelo matemático objetivando a otimização recebe o nome de modelagem (Arora, 2012). Inúmeros métodos para otimização foram desenvolvidos no decorrer dos anos e aplicados às mais diversas áreas, dentre as quais se inclui a engenharia civil.

As restrições de projeto são parte importante de um problema de otimização estrutural, limitando o conjunto de soluções viáveis do problema. De forma geral, as restrições são um conjunto de equações que devem ser respeitadas para garantir resultados com significado real para o problema proposto. O conjunto de restrições de projeto pode ser definido conforme as equações (82) e (83):

$$h_i(x) = 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (82)$$

$$g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, \dots, n \quad (83)$$

Sendo:

m – Número de restrições de igualdade;

n – Número de restrições de desigualdade;

x – Conjunto de variáveis de projeto.

Quando um sistema é modelado e seus parâmetros matemáticos são devidamente estabelecidos, escolhe-se uma característica específica do problema para ser otimizada. A formulação matemática que relaciona os parâmetros do problema e essa característica é a função objetivo, sendo costumeira a busca pelo seu menor valor possível.

O problema clássico de otimização estrutural propõe uma diminuição de custos para execução de uma determinada estrutura. Este tipo de problema considera a massa da estrutura como propriedade a ser otimizada, buscando seu menor valor possível. O princípio é que um consumo diminuído de recursos tende a estar associado a uma estrutura de menor custo de execução, sendo, portanto, a função objetivo a estabelecida pela equação (84):

$$f(x) = \sum_{i=1}^n m_i l_i \quad (84)$$

Em que:

n – Número de elementos da estrutura;

m – Massa linear de cada elemento i da estrutura;

l – Comprimento de cada elemento i da estrutura.

No processo iterativo de otimização, para cada nova configuração de perfis a ser avaliada é realizada uma verificação, sendo então o processo de análise estrutural essencial ao problema, para devida verificação das restrições aplicadas ao problema. Usualmente, o processo de otimização estrutural realiza etapas de otimização e verificação continuamente até que as modificações na estrutura encontradas sejam consideradas insignificantes. Esta avaliação é realizada pela comparação entre um valor de tolerância estabelecido pelo usuário e a variação de valor dos parâmetros e da função objetivo.

Alguns trabalhos consideram a massa específica ou o peso específico dos materiais. Outros ainda calculam o valor total de execução da estrutura com base nos preços correntes de mercado.

Embora a consideração do peso da estrutura como principal fator a ser otimizado para a redução dos custos de uma estrutura seja considerado constantemente como apropriada, existem algumas exceções. Quando se fala de ligações viga-pilar, por exemplo, o fator encarecedor normalmente não é a massa da ligação, mas sim seu custo total de fabricação. Nesses casos, o custo pode ser otimizado considerando, por exemplo, a diminuição do número de peças utilizadas ou da mão-de-obra necessária.

Os fatores da equação (84) normalmente são otimizados em estruturas compostas por barras, como são as estruturas treliçadas e aporticadas, no processo de diminuição da área de seção transversal das barras a serem escolhidas. Na otimização estrutural, os parâmetros a serem modificados são comumente variáveis discretas, sendo considerado um banco de dados com seções transversais pré-definidas. Essa consideração condiz com as práticas estabelecidas no mercado. Os modelos matemáticos clássicos de otimização se preocupam com sistemas contínuos,

sendo incompatíveis com variáveis discretas e, conseqüentemente, com bancos de dados como o citado. O avanço do desenvolvimento computacional permitiu mais recentemente, o desenvolvimento de ferramentas mais simples para a otimização de problemas com variáveis discretas, dentre as quais encontram-se o algoritmo genético, que vem sendo muito utilizado na otimização estrutural (CAMP *et al.*, 2005).

3.7. Otimização Multinível

Algumas vezes, um determinado problema matemático está organizado em uma série de fórmulas que se relacionam hierarquicamente. Esses sistemas podem ser divididos em múltiplos problemas menores de otimização. Quando isso acontece, a utilização de formulações matemáticas para otimização pode ser impedida. Nesses casos, pode-se utilizar das técnicas de otimização multinível (Deng, 1998).

Considerando uma função $f(x)$ que pode ser dividida conforme a equação (85):

$$f(x) = g(x) + \sum_{i=1}^n h_i(x) \quad (85)$$

Sendo:

x – Vetor de variáveis do problema.

Neste problema, pode-se definir a função $g(x)$ como a função líder ou global e as n funções $h(x)$ como as funções subordinadas ou locais. Ambas as funções se relacionam através do vetor x de variáveis do problema. O que vai determinar a posição de uma equação como líder ou subordinada é seu nível hierárquico dentro do problema, tendo funções que contribuem mais para o problema de otimização uma patente maior. Nessa organização, cada equação toma uma série de decisões, sendo

a função líder, a responsável pela determinação das variáveis que mais impactam o resultado final. No exemplo citado, a função $g(x)$ definiria os valores de um vetor de variáveis x_1 . Em seguida, as equações $h(x)$ definiriam, juntas, um vetor de variáveis x_2 . O problema deve ser formulado de forma que $x = x_1 + x_2$. De forma geral, pode-se dizer que um problema de otimização multinível coordena a tomada de decisão em um sistema descentralizado (Deng, 1998).

A consideração de otimização multinível pode ajudar na diminuição do gasto computacional na busca pela solução de problemas, visto que a resolução de um sistema consiste na resolução de suas partes, sistemas fragmentados de menores dimensões.

3.8. Algoritmo Genético

O algoritmo genético é um método estocástico de otimização estrutural que se baseia na simulação computacional de processos da natureza, mais especificamente da teoria Darwiniana de seleção natural, na busca por um resultado ótimo global. Este algoritmo pode ser classificado ainda como um processo evolucionário de otimização. Os algoritmos genéticos (AGs) buscam resultados por meio de processos aleatórios e que não requerem funções contínuas nem diferenciáveis. Apesar de complexo, este método é aplicável à diversos problemas de otimização e facilmente adaptável a novas aplicações. No revés, a aleatoriedade e método de busca por resultados desses algoritmos apresenta uma grande demanda computacional, já que não se utiliza das fórmulas que constituem o problema na busca por soluções. Esse problema pode ser contornado pelo uso de computação paralela ou máquinas mais poderosas, caso necessário. Além disso, não há garantia de obtenção dos valores mínimos globais nem da replicabilidade de resultados. Por isso, é importante a reprodução do código mais vezes e a configuração adequada dos algoritmos (Arora, 2012).

Hoje em dia existem diversas versões de algoritmos genéticos com pequenas modificações para melhor adaptação a problemas específicos. De forma geral, os AGs

baseiam-se na teoria evolucionista de Charles Darwin e no conceito de seleção natural, com procedimentos computacionais que imitam operações genéticas.

3.8.1. Definições

A compreensão do algoritmo genético depende de uma série de conceitos que serão definidos nas seções subseqüentes como cromossomo, população, geração e gene.

3.8.1.1. Indivíduo ou Cromossomo

Um indivíduo, também chamado de cromossomo, é um vetor contendo uma série de parâmetros que caracterizam as variáveis do problema em questão. Considerando uma determinada função objetivo desconhecida $f(x)$, um indivíduo i carrega as informações necessárias para a configuração de uma possível solução $f(x_i)$ do problema. Os indivíduos são modificados, excluídos e criados no decorrer do processo de otimização conforme os critérios dos AGs.

3.8.1.2. População

Um conjunto de indivíduos forma uma população. Para o seu devido funcionamento, o AG requer a geração de uma população inicial, normalmente formada por uma série de indivíduos criados de forma aleatória. O tamanho de uma população, isto é, o número de indivíduos e, portanto, de possíveis soluções por iteração, deve ser definido inicialmente pelo usuário e se mantém inalterado até o fim da execução do AG. Uma população muito grande aumenta as chances de obtenção

de resultados ótimos globais e de aumento da replicabilidade do problema, mas aumenta também o esforço computacional necessário para obtenção de resultados.

3.8.1.3. Geração

Cada ciclo de execução do algoritmo genético é chamado de geração. Na prática, a geração corresponde à população que será testada pelo algoritmo. Assim, tendo em vista uma população P em uma geração x , as modificações realizadas pelo AG na busca de um resultado ótimo retornam uma população P_i em uma geração $x+1$.

3.8.1.4. Gene

Como dito anteriormente, um indivíduo ou cromossomo é um vetor dotado de uma série de variáveis que influenciam a função objetivo. A cada um desses parâmetros variáveis dá-se o nome de gene. Em um problema de otimização estrutural em que se tem um conjunto de perfis metálicos que podem ser utilizados, cada um desses perfis constitui um gene.

3.8.2. Funcionamento do Algoritmo Genético

O processo de otimização do algoritmo genético inicia-se com a definição dos parâmetros de otimização (critério de parada/tolerância, tamanho da população, função objetivo, restrições de projeto, etc.) e criação da população inicial. Essa população é normalmente formada por uma série de indivíduos escolhidos aleatoriamente.

Cada indivíduo da população é então avaliado e classificado de acordo com sua aptidão. Nesse processo, a função de aptidão do algoritmo genético dá uma nota para cada indivíduo. A função atribui um valor ao indivíduo de acordo com o resultado da inserção de seus genes na função objetivo. Esse valor é então penalizado, subtraindo-se dele notas calculadas a partir das funções de restrição. Na prática, quanto mais um determinado indivíduo violar cada restrição e quanto mais restrições ele não for capaz de suprir, mais penalizado ele será.

Com a aptidão de cada indivíduo devidamente calculada, o AG procede para a avaliação da população. Neste momento, o algoritmo compara os resultados obtidos para os indivíduos entre si e com os valores de tolerância adotados pelo usuário. Se as restrições definidas pelo usuário forem atendidas e o algoritmo não for capaz de obter uma solução melhor para a função objetivo, o algoritmo genético considera que o resultado ideal já foi obtido e emite sua resposta ao problema. Caso contrário, o AG procede para a criação de uma nova população, iniciando uma nova iteração.

A criação de uma nova população inicia-se pela seleção de uma parte da população testada. Essa seleção pode ser realizada pelo método da roleta, mas outras funções, como o torneio ou a seleção uniforme, também podem ser utilizadas.

Na roleta, a população é colocada em um tipo de sorteio, como o graficamente representado na Figura 3.7-a. Os indivíduos com maior nota de aptidão têm seções maiores na roleta e, portanto, maior probabilidade de serem selecionados.

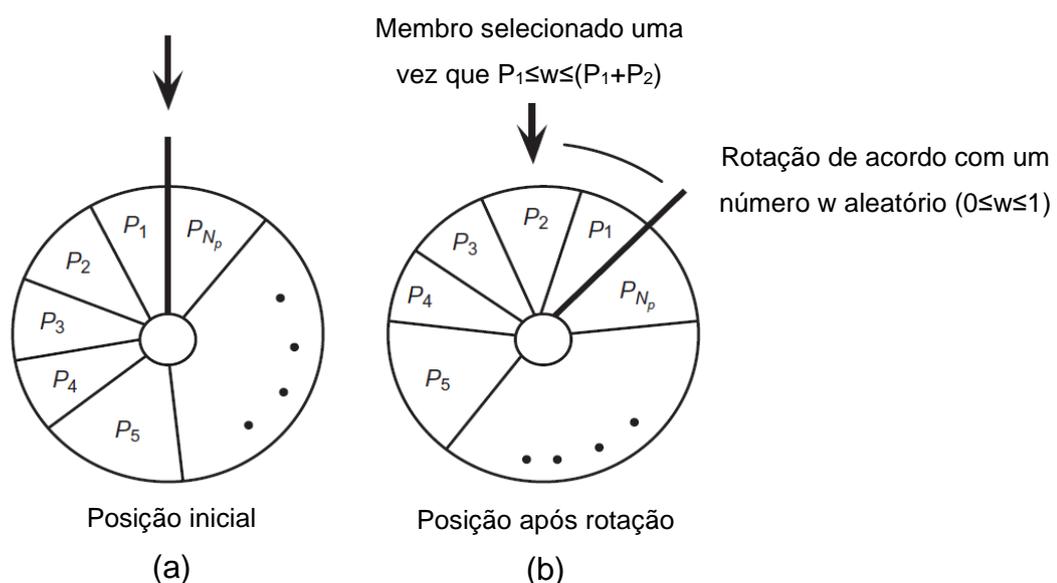


Figura 3.7: Representação de função roleta (Arora, 2012).

Numericamente, é criado um intervalo contínuo de números (na Figura 3.7, de 0 a 1) no qual é criado um subintervalo igualmente contínuo para cada indivíduo. Um número do dito intervalo é então selecionado (Figura 3.7-b), determinando assim o indivíduo escolhido.

A seleção uniforme coloca toda a população em uma linha reta, que então é seccionada em um número de segmentos igual à população total. A função seleciona então o indivíduo mais apto de cada segmento.

O torneio funciona de forma muito parecida com a seleção uniforme, entretanto em vez de uma segmentação da população, o AG escolhe um grupo aleatório de indivíduos. Além disso, os indivíduos são selecionados em etapa, o que significa que se um indivíduo foi sorteado em uma etapa, mas não foi selecionado, ele ainda poderá ser sorteado novamente e selecionado em etapa posterior.

As funções de seleção são realizadas até que o número de indivíduos necessários para a composição da nova população seja adquirido. De forma geral, essas funções buscam imitar a seleção natural através da proliferação dos indivíduos mais aptos, mantendo ainda alguns indivíduos menos aptos pela possibilidade de que estes tenham alguns genes possivelmente interessantes. Após a seleção é iniciada a etapa de cruzamento.

No cruzamento, genes de diferentes indivíduos selecionados são misturados, sendo criados então, novos indivíduos para a população. O número de indivíduos que sofrem o cruzamento pode ser selecionado pelo usuário ou obtido aleatoriamente, dependendo do algoritmo utilizado. O algoritmo pode apresentar ainda uma elite determinada pelo usuário, que é um número de indivíduos que pode passar dessa etapa sem nenhum tipo de alteração. Os tipos de cruzamento mais comumente realizados são os cruzamentos com ponto único de corte ou com um par de pontos de corte.

No cruzamento com ponto único de corte, dois indivíduos são selecionados e um gene de um destes indivíduos é escolhido aleatoriamente. Ambos os cromossomos são então seccionados na mesma região, gerando quatro vetores com genes que

serão recombinados de forma trocada nos indivíduos. Este processo está representado na Figura 3.8.

$$\begin{array}{cc} \mathbf{x}^1 = 101110|1001 & \mathbf{x}^2 = 010100|1011 \\ \text{(a)} & \\ \mathbf{x}^{1'} = 101110|1011 & \mathbf{x}^{2'} = 010100|1001 \\ \text{(b)} & \end{array}$$

Figura 3.8: Cruzamento com ponto único de corte antes (a) e depois (b) da realização do procedimento (Arora,2012).

O cruzamento com um par de pontos de corte é realizado de maneira similar ao cruzamento com ponto único de corte, entretanto, cada cromossomo é dividido em 3 partes em vez de 2. A Figura 3.9 representa essa operação de cruzamento.

$$\begin{array}{cc} \mathbf{x}^1 = 101|1101|001 & \mathbf{x}^2 = 010|1001|011 \\ \text{(a)} & \\ \mathbf{x}^{1'} = 101|1001|001 & \mathbf{x}^{2'} = 010|1101|011 \\ \text{(b)} & \end{array}$$

Figura 3.9: Cruzamento com par de pontos de corte antes (a) e depois (b) da realização do procedimento (Arora,2012).

Os indivíduos que são selecionados para os cruzamentos são conhecidos como pais antes da realização da operação e como filhos após o procedimento. Depois da criação de todos os filhos desejados, o algoritmo genético passa para uma etapa de mutação.

Na mutação, um determinado número de indivíduos, normalmente escolhido pelo usuário, sofre modificações em seus genes. Esse processo seleciona indivíduos

aleatoriamente e modifica um ou mais de seus genes, também selecionados de forma randômica, de acordo com os limites numéricos fornecidos nas restrições do problema de otimização. Como o AG não utiliza as funções de restrição nem a função objetivo para guiar as modificações realizadas na população e aproxima sempre a população, a cada nova geração, ao indivíduo mais apto, a mutação garante que genes que foram inicialmente descartados sejam testados com os genes predominantes, aumentando a chance de se obter um mínimo global em vez de um mínimo local. Em AGs que consideram a existência de uma elite, que também não costuma sofrer mutações.

Considerando as etapas de cruzamento e mutação, que podem afetar populações de tamanhos variados, há a possibilidade de a população piorar de uma geração para a outra, afastando-se do valor mínimo da função objetivo. Para evitar esse problema o usuário deve configurar o algoritmo genético com muita atenção e, idealmente, realizar testes com configurações diferentes antes de iniciar a otimização. Há também a possibilidade da designação de um líder a cada geração. O líder é sempre o indivíduo que apresenta a maior aptidão possível, e ele sempre passa para a geração seguinte intacto, sem sofrer qualquer tipo de modificação. Isso garante não apenas que a cada nova geração o valor mínimo encontrado pelo AG seja menor ou igual ao encontrado na geração anterior, mas também que os genes que apresentaram o melhor desempenho na geração anterior não irão desaparecer completamente em um processo de mutação.

Após a realização da mutação, a nova geração foi devidamente criada para avaliação dos critérios de parada. Nesse ponto, o cálculo da aptidão dos indivíduos é realizado e o AG verifica se os critérios de parada determinados pelo usuário foram atendidos. Caso contrário, o algoritmo passa novamente pelos processos de seleção, cruzamento e mutação, criando uma nova geração que será avaliada. O processo é assim sucessivamente realizado até que os critérios de parada sejam atendidos, sendo o resultado do problema o indivíduo mais apto da última geração criada pelo algoritmo. A Figura 3.10 apresenta um fluxograma do processo de otimização por algoritmo genético.

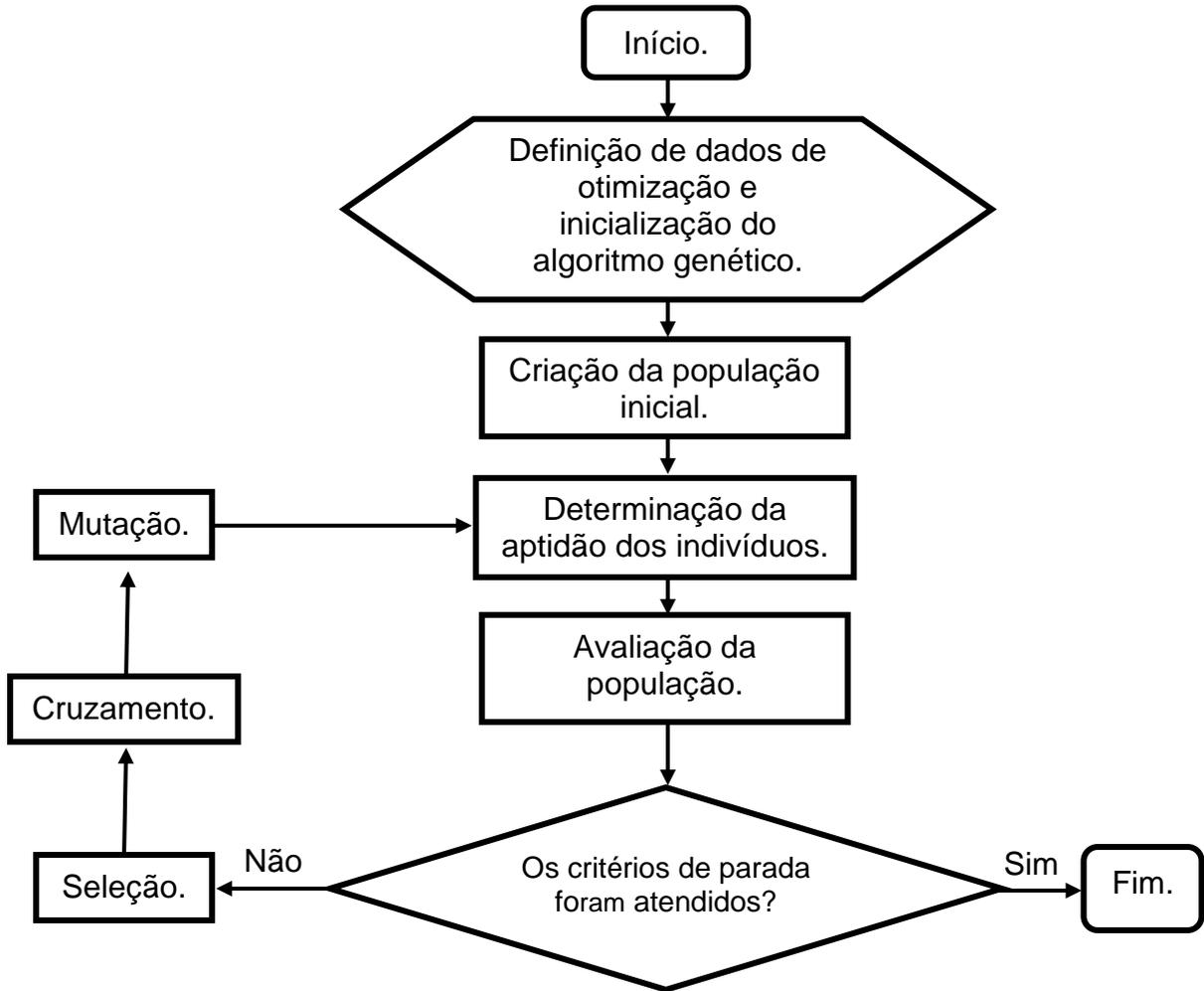


Figura 3.10: Fluxograma com representação do funcionamento do algoritmo genético.

4. Metodologia desenvolvida

A metodologia computacional implementada é capaz de realizar a otimização em dois níveis de um pórtico estrutural (otimização global) e suas ligações viga-pilar (otimização local). A otimização global busca os perfis ótimos para vigas e pilares e apresenta como restrições os limites de resistência e construção em aço apresentados pela norma brasileira e algumas restrições geométricas adicionais. A otimização local busca as dimensões ótimas das ligações viga-pilar de acordo com os critérios de dimensionamento da norma europeia EN 1993-1-8 (CEN, 2011) para construção de estruturas em aço e algumas considerações geométricas adicionais. A metodologia proposta busca a estrutura com o menor custo. Para tanto, o algoritmo minimiza o peso dos perfis estruturais e o peso equivalente das ligações viga-pilar, considerando que um consumo menor de aço tem como consequência um custo menor da construção. Este capítulo traz os detalhes específicos do trabalho computacional realizado e seu funcionamento.

4.1. Considerações da otimização global

4.1.1. Variáveis de projeto

O conjunto de variáveis de projeto para a otimização do pórtico é composto por um vetor x de números inteiros, tendo como número de elementos, o número de grupos de perfis a ser otimizado. Os elementos do vetor podem assumir valores de 1 a 107, sendo cada valor associado a um dos elementos da tabela de perfis comerciais disponibilizado pela empresa privada Gerdau. Esta compõe um banco de dados de 107 perfis do tipo I com diversas informações físicas como a massa linear do perfil, a altura da seção, a área da seção, etc.

4.1.2.Função objetivo

A função objetivo considerada é apresentada pela equação (84) (item 3.6), que calcula a soma da massa de todos os elementos de viga e pilar. Sendo assim, a otimização é caracterizada por um problema de minimização, conforme usualmente considerado nos problemas de otimização.

4.1.3.Restrições

A otimização do pórtico considera como restrições de projeto os critérios de resistência da norma brasileira de construção em aço NBR 8800 (ABNT, 2008), apresentados nas equações (79) e (80) (item 3.5.3). Todas as considerações e coeficientes associados ao cálculo das resistências estão apresentados nos itens 3.5.1 e 3.5.2. Os valores de esforços solicitantes foram obtidos de acordo com o item 3.4.2.

O limite de esbeltez apresentado pela equação (81) (item 3.5.4) também foi implementado, compondo, portanto, as restrições de projeto, tal como as considerações de restrição de deslocamentos presentes no item 3.5.5.

Em adição a todas essas considerações, a implementação ainda leva em conta critérios geométricos de dimensionamento. Estas garantem que um pilar contínuo tenha uma manutenção ou diminuição em sua área de seção transversal com o ganho de altura, evitando que a seção dos pavimentos superiores seja mais robusta que a dos inferiores.

Os elementos estruturais escolhidos têm uma grande influência nos valores de rigidez e resistência de uma ligação viga-pilar. A mudança de perfis sem considerar as consequências no dimensionamento da ligação podem causar a divergência do problema de otimização. Assim, embora o nível global de otimização não dimensione as ligações, as considerações de resistência de ligações semirrígidas apresentadas pela norma EN 1993-1-8 (CEN, 2011) também compuseram o corpo de restrições do

problema de otimização do pórtico. Pelo mesmo motivo as variações de perfis foram limitadas à apenas 20% do banco de dados de 107 perfis em cada ciclo iterativo, sendo esses 20% compostos pelos perfis de dimensões mais próximas às apresentadas pelos perfis ótimos da iteração anterior.

4.2. Considerações da otimização local

Para o dimensionamento de ligações viga-pilar, foi considerado um modelo de ligação com chapa de extremidade, com a viga soldada e a coluna parafusada à chapa por meio de três fileiras de parafuso, com dois parafusos em cada, conforme a Figura 4.1.

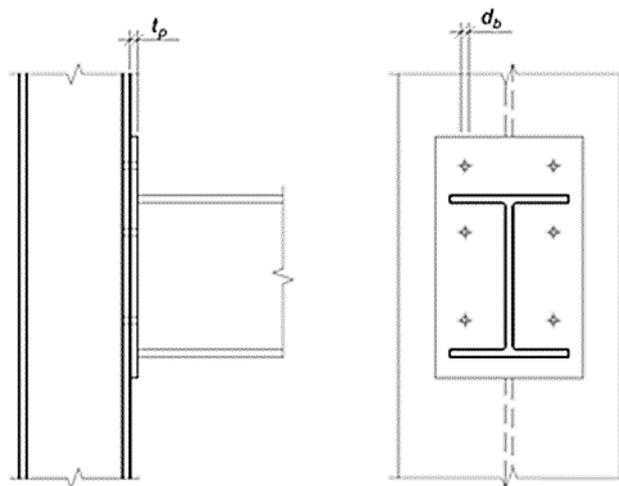


Figura 4.1: Ligação de chapa de extremidade adotada na otimização.

4.2.1. Variáveis de projeto

Foram consideradas como variáveis de projeto, o diâmetro do parafuso (d_p) e a espessura da chapa (t_p), estando todas as demais dimensões em função destas (Sánchez-Olivares e Espín, 2013).

Um banco de dados com 9 possíveis valores de diâmetro de parafuso, que variam de 12 a 36 milímetros, e um banco de dados de 15 diferentes espessuras de chapa, que variam de 6,3 milímetros a 1 centímetro, foram considerados na otimização.

4.2.2. Função objetivo

Diferente do que ocorre com os perfis estruturais do pórtico, o custo de uma ligação viga-pilar não é diretamente proporcional ao seu peso. Isso porque o valor da execução de uma ligação não está ligado apenas ao consumo de materiais, mas também à mão-de-obra e processos necessários para sua fabricação e montagem.

Uma série de estudos busca definir a melhor maneira de se determinar o preço de uma ligação viga-pilar. Dentre as possibilidades está o cálculo de sua massa equivalente. A metodologia consiste em converter o custo de uma ligação ao que este equivaleria caso fosse o custo de massa de aço. Assim, ao invés de calcular o valor deste elemento em termos monetários, o preço da ligação viga-pilar é obtido em quilos, sendo, portanto, compatível com a equação (84) (item 3.6) usada na otimização do pórtico. Isto faz com que na presente pesquisa, essa metodologia torne-se não apenas simples, mas conveniente (Sánchez-Olivares e Espín, 2013).

A equação (86) mostra o cálculo da massa equivalente de uma ligação viga-pilar.

$$f(x) = \sum_{k=1}^n (\beta_0 + \beta_1 S_{j,ini k}) \quad (86)$$

Em que β_0 e β_1 são parâmetros que, no caso de ligações de chapa de extremidade, assumem os valores de 43,176 e 0,000335, respectivamente, n é o número de ligações viga-pilar e $S_{j,ini k}$ é a rigidez inicial da ligação k , calculado conforme a equação (11) (item 3.3.7) considerando $\mu = 1$.

4.2.3. Restrições

A equação (87) representa a restrição de resistência de projeto das ligações semirrígidas.

$$M_{j,Sd} \leq M_{j,Rd} \quad (87)$$

Em que $M_{j,Sd}$ é o momento solicitante da ligação semirrígida, obtido através da análise estrutural do pórtico, e $M_{j,Rd}$ é o momento resistente da ligação semirrígida, calculado conforme a norma europeia EN 1993-1-8 (CEN, 2011) para estruturas em aço. A análise estrutural realizada foi não-linear geométrica, conforme os itens 3.1 e 3.4, sendo considerados elementos finitos com seis graus de liberdade, conforme a Figura 3.6.

Além da equação (87), foi considerado como uma restrição de projeto, a impossibilidade da rigidez inicial de receber valores negativos, impedindo a criação de configurações fisicamente impossíveis de ligações viga-pilar. Essa restrição foi imposta por meio da limitação do banco de dados do problema local de otimização de acordo com os critérios de implementação do módulo computacional de otimização estrutural apresentado no item F do Apêndice I deste documento.

Considerando as práticas correntes do campo da engenharia, as chapas de extremidade das ligações tiveram suas espessuras limitadas, assumindo no máximo o dobro da espessura das abas do pilar ao qual estas encontram-se parafusadas.

4.3. Algoritmo de otimização

A otimização de um pórtico com ligações semirrígidas pode demandar um grande custo computacional. Isso porque um maior número de variáveis aumenta exponencialmente a complexidade do sistema. Tentando contornar este problema, o

trabalho realizado centra-se em torno da implementação de uma otimização estrutural multinível para pórticos planos com ligações semirrígidas. A implementação foi realizada conforme o seguinte algoritmo matemático:

```

k = 0;
ε = 1x10-4;

para cada grupo k de perfis:
    Xg,k = 107;
fim;

para cada grupo k de ligações viga-pilar:
    Xl,k = (9, 15);
fim;

enquanto |Sj,ini,k+1 - Sj,ini,k| > ε:

    min FOg,k, sujeito à g(Xg,k) com valores fixos de Xl,k e 1 ≤ Xg,k ≤ 107;
    obtém-se Xg,k+1 e FOg,k+1;

    para cada grupo i de ligações viga-pilar:
        min FOl,i,k, sujeito à g(Xl,i,k) com valores fixos de Xg,k+1 e (1, 1) ≤ Xl,i,k ≤ (9, 15);
    fim;
    obtém-se Xl,k+1, Sj,ini,k+1 e FOl,k+1;

    k=k+1;

fim;

FO = FOg,i+1 + FOl,i+1;
imprimir (Xg,i+1, Xl,i+1, FOg,i+1, FOl,i+1, FO);
fim.

```

em que o subíndice g representa elementos pertencentes à etapa global de otimização, o subíndice l representa elementos pertencentes à etapa local de otimização, FO é a função objetivo e X é o vetor de variáveis de projeto.

O objetivo do processo é a diminuição dos custos da estrutura metálica, sendo este avaliado pela soma de valores obtidos pelas funções objetivo dos níveis global e local de otimização, conforme especificado nos itens 4.1.2 e 4.2.2. Todos os processos de otimização foram realizados por meio do algoritmo genético (item 3.8).

Assim, o código implementado promove a interação de dois processos de otimização, uma otimização global que busca identificar os perfis ótimos das vigas e pilares das estruturas aporricadas, considerando uma dada configuração de

dimensões d_p e t_p das ligações, e uma otimização local, que otimiza cada uma das ligações viga-pilar. Os resultados são integrados por meio de um algoritmo externo, configurando assim, o problema de otimização bi nível. A Figura 4.2 representa o esquema geral da metodologia de otimização bi nível implementada.

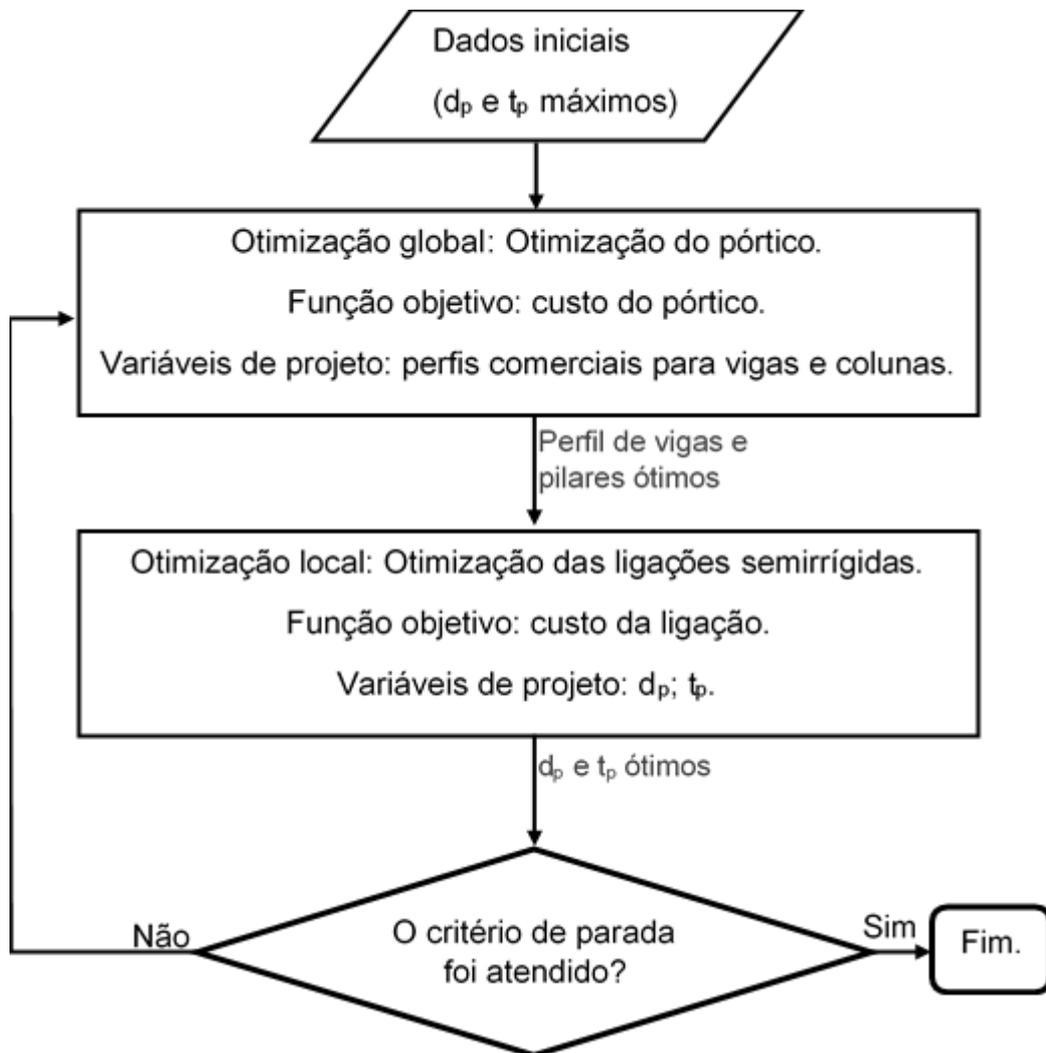


Figura 4.2: Fluxograma de otimização estrutural bi nível

Conforme representado na Figura 4.2, o algoritmo inicia-se através da definição dos dados iniciais do problema. Essas informações são fornecidas pelo próprio usuário, por meio de planilhas em EXCEL® (arquivos em formato .xls) que contêm informações necessárias para otimização do pórtico e das ligações. Assim, o programa é capaz de interpretar a estrutura considerando coordenadas de nós, comprimentos de barras, posições dos nós, etc. Além dessas considerações

corriqueiras de projetos de pórtico de aço, considera-se também que todas as ligações viga-pilar apresentam os maiores valores de d_p e t_p possíveis, de acordo com o banco de dados. Para esta configuração, espera-se que as ligações apresentem um comportamento rígido.

De posse dos dados iniciais, o programa inicia a otimização global do pórtico por meio do algoritmo genético (item 3.8). A partir da segunda iteração, o programa passa a obter esses valores de d_p e t_p da otimização local e a calcular os coeficientes de rigidez das ligações a partir destes.

A consideração da rigidez é necessária para a análise estrutural, em que esta influencia os valores de esforços solicitantes obtidos (item 3.4), e para o cálculo dos momentos fletores resistentes (M_{Rd}), em que a rigidez influencia o valor do coeficiente de flambagem K (item 3.5.1.2).

Os critérios de Estado Limite Último e Estado Limite de Serviço explicitados na norma brasileira NBR 8800 (ABNT,2008) são avaliados através das restrições de projeto. O processo de otimização global é melhor representado pela Figura 4.3, que apresenta a lógica computacional implementada em forma de fluxograma.

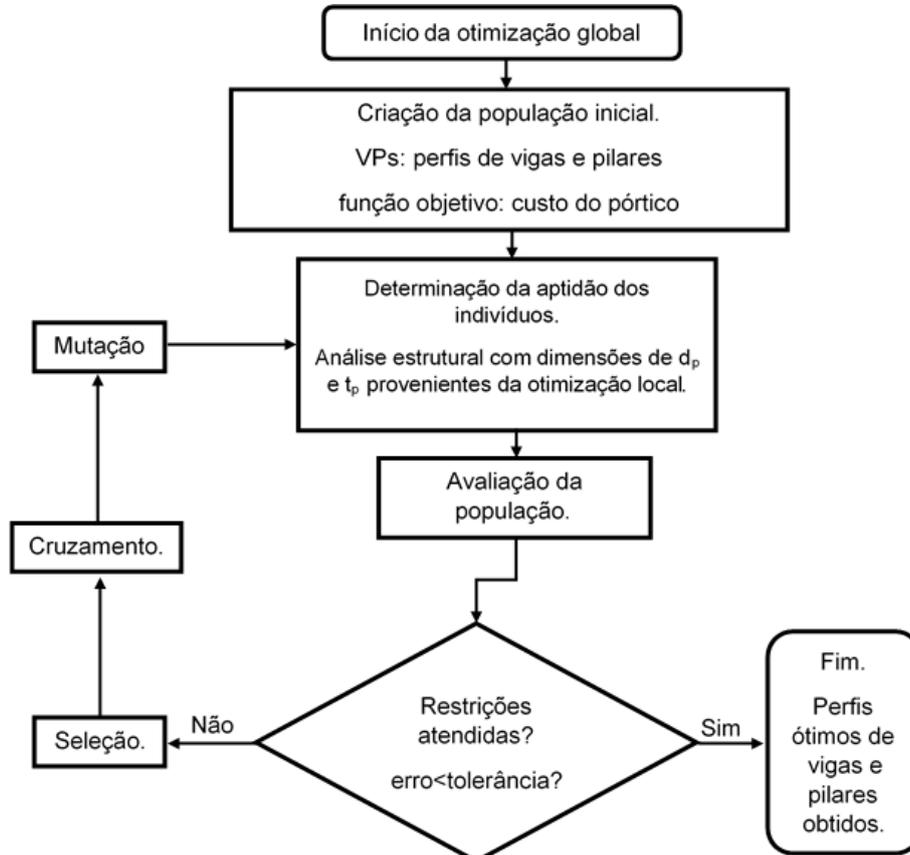


Figura 4.3: Fluxograma com AG para otimização global.

Uma vez que a otimização global é realizada, o algoritmo procede a realizar a otimização de cada ligação viga-pilar do pórtico estudado. Os perfis encontrados na otimização global para vigas e pilares são utilizados nesta etapa para possibilitar o cálculo da rigidez inicial ótima e do esforço resistente das ligações segundo o método das componentes (item 3.3) explícito na norma EN 1993-1-8 (CEN, 2011), conforme recomendado pela NBR 8800 (ABNT, 2008). O processo de otimização local é melhor representado pela Figura 4.4, que apresenta um fluxograma da otimização local.

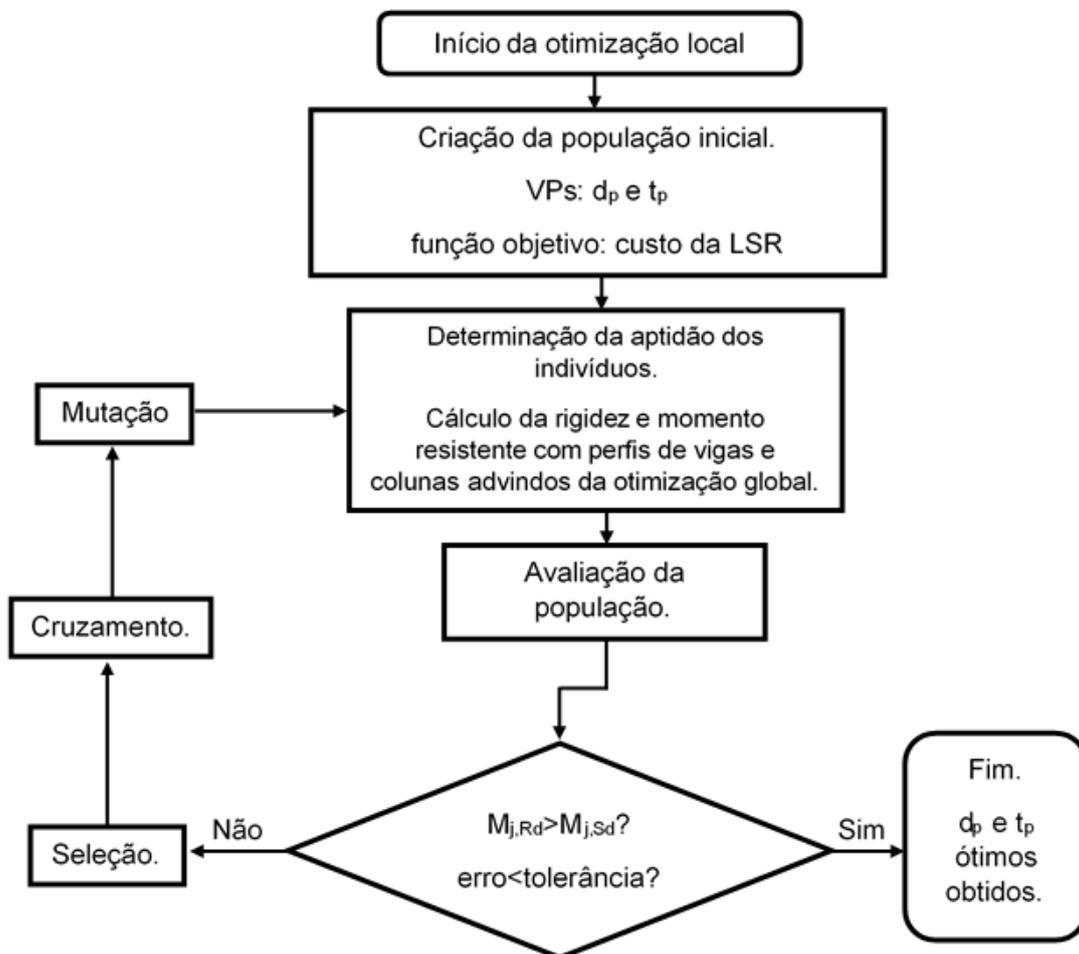


Figura 4.4: Fluxograma com AG para otimização local.

Os valores de d_p e t_p da primeira otimização das ligações são utilizados na segunda otimização do pórtico. Os valores da segunda otimização das ligações são utilizados na terceira otimização do pórtico e assim por diante. Assim, percebe-se que, para um determinado ciclo iterativo N , a otimização de número N do pórtico basear-se-á nas

dimensões geométricas das ligações obtidas no ciclo iterativo N-1. De forma similar, a otimização de número N das ligações terá seus valores de d_p e t_p transmitidos para a otimização N+1 do pórtico, caso esta venha a ocorrer. Esta constatação encontra-se ilustrada na Figura 4.5, que esquematiza o compartilhamento de dados entre as otimizações em forma de fluxograma.

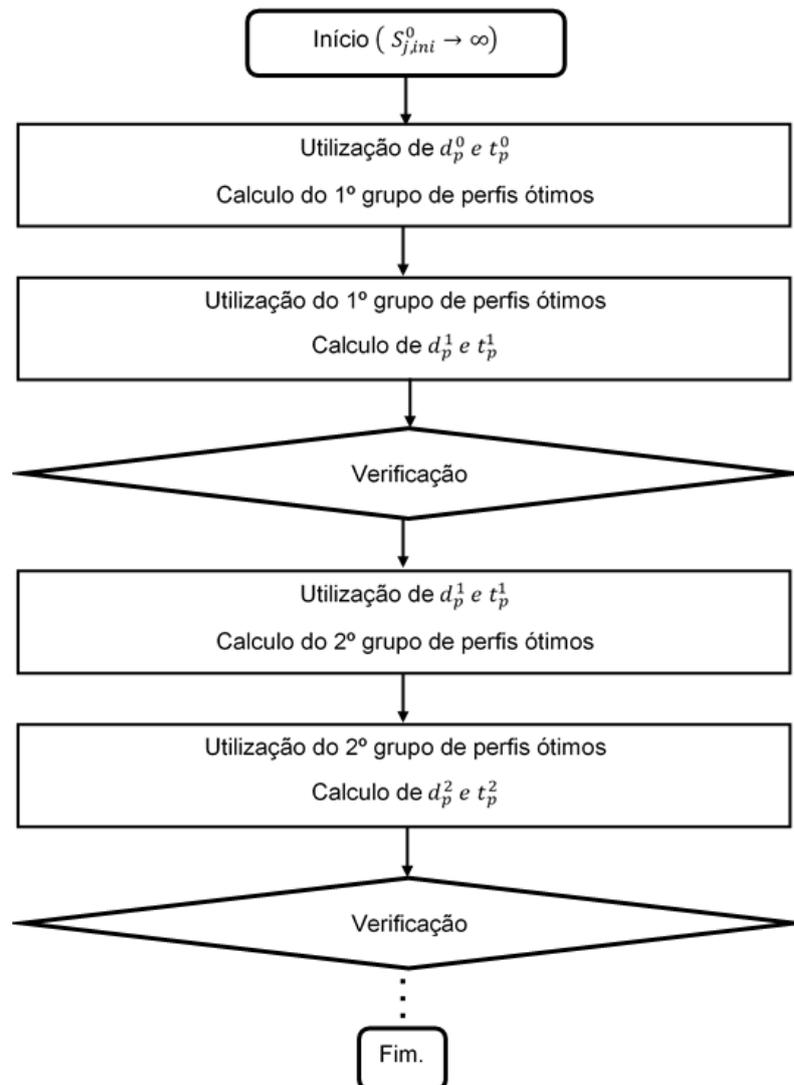


Figura 4.5: Compartilhamento de dados entre as otimizações global e local.

Desta maneira, no momento da verificação de uma otimização N, os perfis de vigas e pilares foram calculados e, portanto, são compatíveis com as ligações viga-pilar dimensionadas na otimização N-1. A otimização de ligações N, por sua vez, estará completamente compatibilizada com os perfis ótimos encontrados nesta mesma etapa N. Assim, para garantir que a otimização em dois níveis foi finalizada com resultados

compatíveis entre o dimensionamento de perfis e ligações viga-pilar, a etapa de verificação ilustrada na Figura 4.2, que é a mesma da Figura 4.5, deverá se certificar de que a variação da rigidez inicial de uma etapa N de otimização é considerada desprezível na comparação com os valores encontrados na etapa $N-1$.

O cálculo de valores de rigidez inicial conforme o método das componentes leva em consideração os perfis de colunas e vigas que são conectados por uma ligação viga-pilar. Assim, variações desprezíveis nas dimensões geométricas de elementos estruturais são necessárias para garantir uma variação desprezível na rigidez inicial de uma ligação entre duas etapas consecutivas de otimização.

Portanto, para duas etapas consecutivas de otimizações globais e locais, a confirmação de que a variação de rigidez inicial $\Delta S_{j,ini}$ pode ser considerada como desprezível é garantia suficiente de que o pórtico dimensionado é completamente compatível com as ligações viga-pilar dimensionadas na segunda das etapas. Além disso, este critério também assegura que a variação de dimensões de perfis comerciais do pórtico pode ser considerada insignificante. Portanto, a equação (88) é critério de parada suficientemente satisfatório para a finalização do ciclo iterativo retratado na Figura 4.1 e, assim, fim do processo de otimização.

$$S_{j,ini}^N - S_{j,ini}^{N-1} \leq tol \quad (88)$$

Em que N é a etapa de otimização na qual a verificação está sendo realizada e tol é um valor de tolerância considerado como insignificante para a magnitude dos valores de $S_{j,ini}$ das etapas N e $N-1$, sendo utilizado o valor de $10E-20$ na implementação realizada.

O código de otimização criado para a realização deste trabalho foi escrito e organizado em um total de quarenta diferentes funções computacionais, salvas em programas de extensão `.m`, compatíveis com o software comercial MATLAB®. O Anexo I lista e descreve as funções implementadas para melhor compreensão do algoritmo implementado.

4.3.1. Validação da análise estrutural do pórtico

Para validação dos códigos computacionais implementados foi realizada a otimização de um pórtico simples, apresentado no exemplo exs6 do CALFEM (Austrell *et al.*, 2004), retratado na Figura 4.6.

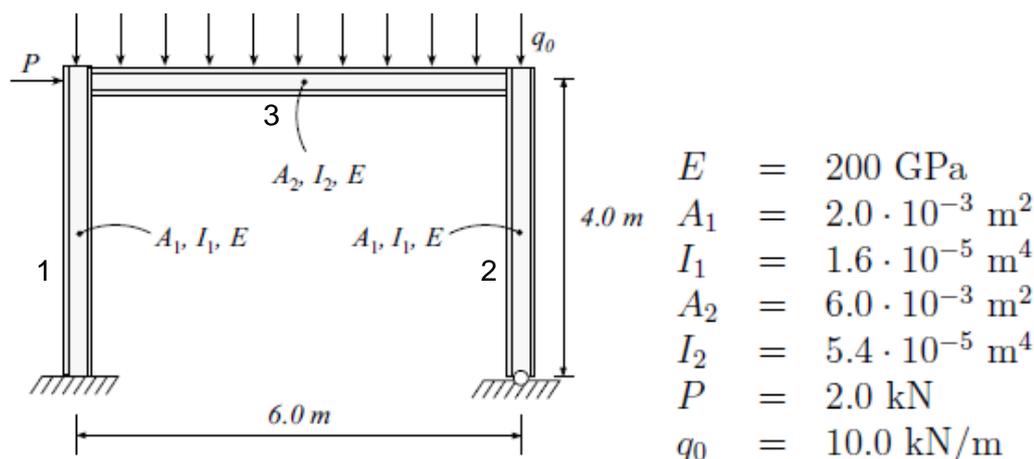


Figura 4.6: Modelo estrutural proposto no exemplo exs6 do CALFEM (Austrell *et al.*, 2004).

O algoritmo de otimização alterou as seções da viga e dos pilares de maneira livre, em que o grupo 1 representa o pilar esquerdo, o grupo 2 representa o pilar direito e o grupo 3 representa a viga. No caso das ligações, o grupo A representa a ligação à esquerda, enquanto o grupo B representa a ligação da direita. As tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os resultados obtidos para perfis metálicos e ligações viga-pilar, respectivamente.

Tabela 4.1: Resultados obtidos para perfis estruturais do pórtico do exemplo exs6.

Grupo	Perfis
1	W 150 x 18,0
2	W 150 x 24,0
3	W 150 x 18,0
massa	276 kg

Tabela 4.2: Resultados obtidos para ligações viga-pilar do pórtico do exemplo exs6.

Grupo	d_p (mm)	t_p (mm)
A	20	9,5
B	20	12,5
Massa equivalente		89,27 kg

A massa dos perfis estruturais foi de 276 kg, conforme a Tabela 4.1. A massa equivalente das ligações foi de 89,27 kg, conforme a Tabela 4.2. Com isso em mente, a massa equivalente do pórtico obtido pelo algoritmo foi de 365,27 kg.

O módulo computacional FRP_AnaliseEstrutural foi utilizado para os perfis e as rigidezes iniciais de ligações encontrados na otimização. Como resultado, foram obtidas as reações de apoio e os deslocamentos dos nós. A rigidez rotacional encontrada foi de aproximadamente 43500 kNm/rad para a ligação da esquerda e 56900 kNm/rad para a da direita, sendo ambas as ligações no exemplo em questão classificadas como semirrígidas. A mesma estrutura foi inserida no software comercial de análise estrutural Robot Structural Analysis. As tabelas 4.3 e 4.4 comparam os resultados obtidos para ambos.

Tabela 4.3: Resultados do exs6 para as reações.

Esforço	Reações					
	Ha(kN)	Va(kN)	Ma(kNrad)	Hb(kN)	Vb(kN)	Mb(kNrad)
Presente trabalho	7,060	29,205	9,240	-9,060	30,800	-12,476
Robot Structural Analysis	7,082	29,203	9,251	-9,082	30,797	-12,532
Erro	0,022	0,002	0,011	0,022	0,003	0,056
Erro (%)	0,31%	0,01%	0,12%	-0,25%	0,01%	-0,45%

Tabela 4.4: Resultados do exs6 para os deslocamentos.

Grau de liberdade	Deslocamentos por grau de liberdade					
	4 (mm)	5 (mm)	6 (rad)	7 (mm)	8 (mm)	9 (rad)
Presente trabalho	1,0182	-0,2435	-0,0103	0,9049	-0,1908	0,0081
Robot Structural Analysis	1,1227	-0,2488	-0,0106	1,0067	-0,1965	0,0084
Erro	0,1045	0,0053	0,0003	0,1018	0,0057	0,0003
Erro (%)	9,31%	-2,12%	-2,66%	10,12%	-2,91%	3,64%

A Tabela 4.3 mostra os valores de reações horizontais (H), verticais (V) e de momentos fletores (M) para os apoios da esquerda (a) e da direita (b) da estrutura. A Tabela 4.4 apresenta os deslocamentos dos graus de liberdade da ligação viga-pilar da esquerda (4,5 e 6) e da direita (7,8 e 9) do pórtico.

A comparação revela que todas as reações apresentaram um erro muito pequeno, normalizando confortavelmente abaixo de 1% entre os programas. Os deslocamentos apresentados foram mínimos e apresentaram erros percentuais baixos. Apenas um grau de liberdade ultrapassou a casa dos 10%, no entanto o valor absoluto do erro do deslocamento é mínimo. No final, mesmo considerando modelos diferentes de análise, ambos os recursos computacionais apresentam tendências semelhantes de valores obtidos para esforços e deslocamentos.

4.3.2. Validação da análise das ligações

Antes de iniciadas as aplicações do algoritmo, o código para análise das ligações também foi verificado. A validação da análise da ligação foi feita por meio do modelo T101.010, anteriormente utilizado por Janss (1987), Faella (2000), Díaz (2010) e Hortencio (2017). A Figura 4.7 ilustra o modelo utilizado.

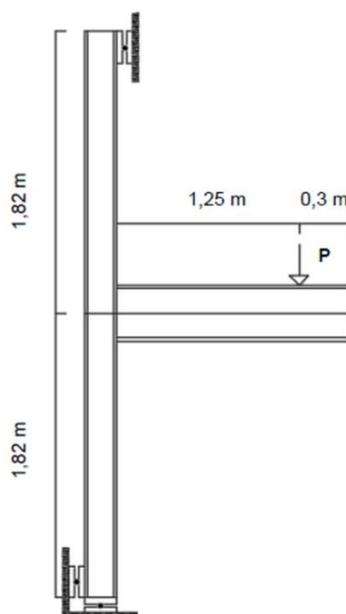


Figura 4.7: Modelo T101.010 para validação da análise das ligações.

A ligação viga-pilar do modelo proposto tem seus parâmetros listados nas tabelas 4.5 a 4.7. A Tabela 4.5 contém os parâmetros dimensionais da ligação. A Tabela 4.6 contém os parâmetros de resistência dos diferentes elementos de aço utilizados. A Tabela 4.7 apresenta os parâmetros dimensionais da viga, do pilar e da chapa de extremidade.

Tabela 4.5: Disposições dimensionais da ligação do modelo T101.010.

Dimensões (mm)							
Soldas		Parafusos (M20)		Disposição geométrica			
a_{wp}	4	d	20	l_{ps}	70	e_x	30
a_{fp}	6	d_0	22	l_{pi}	11,2	p_x	90
				e	30	p	200
				w	90		

Tabela 4.6: Tensões de ruptura, escoamento e módulo de elasticidade dos materiais utilizados no modelo T101.010.

Tensão (MPa)							
Pilar		Viga		Chapa de extremidade		Parafusos	
E	210000	E	210000	E	210000	E	210000
$f_{y,fc}$	280	$f_{y,fb}$	303	$f_{y,p}$	291,5	$f_{y,b}$	900
$f_{y,wc}$	298,8	$f_{y,wb}$	314,8	$f_{u,p}$	463,4	$f_{u,b}$	1000
$f_{u,fc}$	422,3	$f_{u,fb}$	447				
$f_{u,wc}$	422	$f_{u,wb}$	443				

Tabela 4.7: Disposições dimensionais de elementos do modelo T101.010.

Dimensões (mm)					
Pilar		Viga		Chapa de extremidade	
h_c	162,5	h_b	298,8	h_p	380
t_{wc}	8,5	t_{wb}	7,3	b_p	150
t_{fc}	12,6	t_{fb}	10,8	t_p	20
b_c	160,1	b_b	150,9		
r_c	15	r_b	15		

Os parâmetros apresentados foram inseridos em um arquivo de dados e introduzidos ao código FRL_CalcUS do algoritmo desenvolvido. A Tabela 4.8 compara os resultados encontrados com os apresentados na base bibliográfica.

Tabela 4.8: Comparação de resultados do modelo T101.010.

	Janss	Faella	Díaz	Hortencio	Presente Trabalho
$S_{j,ini}$ (kNm/rad)	25316	20805	24181	24493	23572,85
$S_{j,ini}$ (%)	107,4%	88,3%	102,6%	103,9%	100%
$M_{j,Rd}$ (kNm)	96,36	100,05	93,70	93,90	91,03
$M_{j,Rd}$ (%)	105,9%	109,9%	102,9%	103,2%	100%

Pela observação da Tabela 4.8 nota-se que o presente trabalho encontrou um valor de rigidez inicial dentro do esperado, sendo este o segundo menor valor dentre a bibliografia comparada. Há uma diferença de 7,4% para o maior valor de rigidez inicial observado, obtido por Janss, e 1,7% para o menor valor dentre os comparados, obtido por Faella. Além disso, o algoritmo encontrou um momento resistente da ligação menor dentre os observados, com uma diferença de até 9,9% dos valores observados na bibliografia. Assim, constata-se que qualquer momento solicitante que satisfaça os demais problemas das referências apresentadas é compatível com o algoritmo desenvolvido na presente pesquisa, mas alguns valores que satisfariam o algoritmo desenvolvido seriam insatisfatórios nos demais. Com isso em mente, pode-se dizer que o momento resistente do algoritmo desenvolvido tem caráter conservador, diminuindo a quantidade de possíveis soluções do sistema em comparação com a referência e contribuindo assim para a segurança do projeto. Os dados encontrados trazem a conclusão de que a análise de ligações viga-pilar se encontra corretamente implementada.

5. Resultados

Para todas as aplicações computacionais documentadas nos itens subsequentes, as seguintes considerações de resistência foram adotadas:

- **Módulo de elasticidade de Young:** $E = 206 \text{ GPa}$ para a estrutura P1v2a; $E = 210 \text{ GPa}$ para as demais;
- **Resistência ao escoamento do aço:** $f_y = 250 \text{ MPa}$;
- **Resistência de ruptura do aço:** $f_u = 450 \text{ MPa}$;
- **Resistência à ruptura dos parafusos:** $f_{ub} = 415 \text{ MPa}$;
- **Material das soldas:** S 275.

Os valores de resistência escolhidos têm como objetivo manter o padrão com a bibliografia de referência adotada, a fim de garantir comparações de resultados com a menor variação de metodologia possível.

Uma série de hipóteses simplificadoras foram adotadas para a análise estrutural dos pórticos. Em todos os exemplos o aço foi considerado homogêneo e isotrópico, todos os apoios foram considerados como engastes e todos os carregamentos representados são estáticos.

Além disso, o algoritmo genético foi configurado conforme os seguintes parâmetros:

Para ambos os níveis local e global:

- **Operador de crossover:** *crossover uniforme*;
- **Operador de mutação:** *mutação com distribuição Gaussiana*;
- **Operador de seleção:** *estocástico uniforme*;
- **Número máximo de gerações:** *100 gerações*.

Apenas para o nível global:

- **Tamanho da população:** Dez vezes o número de variáveis para os exemplos P1v2a e P3v2a (portanto 40 indivíduos em ambos); dois mil indivíduos para o exemplo P3v10a;
- **População inicial:** Todos indivíduos com o perfil de maior área do banco de dados na primeira iteração; a melhor configuração obtida no nível global do ciclo iterativo anterior nas demais;
- **Taxa de elitismo** = número de variáveis;
- **Taxa de crossover:** 70% da população que não sofreu elitismo;
- **Tolerância da função objetivo:** 1E-3;
- **Tolerância das funções de restrição:** 1E-3;
- **Número máximo de gerações iguais:** 10.

Apenas para o nível local:

- **Tamanho da população:** Três indivíduos;
- **População inicial:** Maior valor possível de dp e tp dentro do banco de dados (36 mm e 100 mm, respectivamente);
- **Taxa de elitismo:** Um indivíduo;
- **Taxa de crossover:** 80% da população que não sofreu elitismo;
- **Tolerância da função objetivo:** 1E-2;
- **Tolerância das funções de restrição:** 1E-5;
- **Número máximo de gerações iguais:** 7.

Há uma variação no tamanho da população entre exemplos. Isso ocorre porque o exemplo P3v10a tem um número muito maior de variáveis que as demais e, assim, um número muito maior de possíveis combinações de perfis. Se fosse feita a verificação de cada possível combinação de perfis com o banco de dados de 107 perfis para o problema P3v10a, aproximadamente $3.8697E40$ estruturas seriam testadas.

Como cada grupo de ligações é otimizado de forma individual no nível local, sendo o número de otimizações realizadas por ciclo deste nível igual ao número de grupos de ligações considerados, cada otimização tem um número pequeno de variáveis.

Além disso, os bancos de dados de d_p e t_p são muito menores que o banco de dados de perfis. Como consequência, o tamanho da população, a taxa de elitismo e o número mínimo de repetições com valores dentro da tolerância foram reduzidos. Além disso, a tolerância das funções de restrição foi diminuída para garantir resultados de boa qualidade.

5.1. Primeira implementação: Pórtico P1v2a

Simões (1996) propôs em seu artigo, o problema de otimização de pórticos com ligações semirrígidas ilustrado na Figura 5.1.

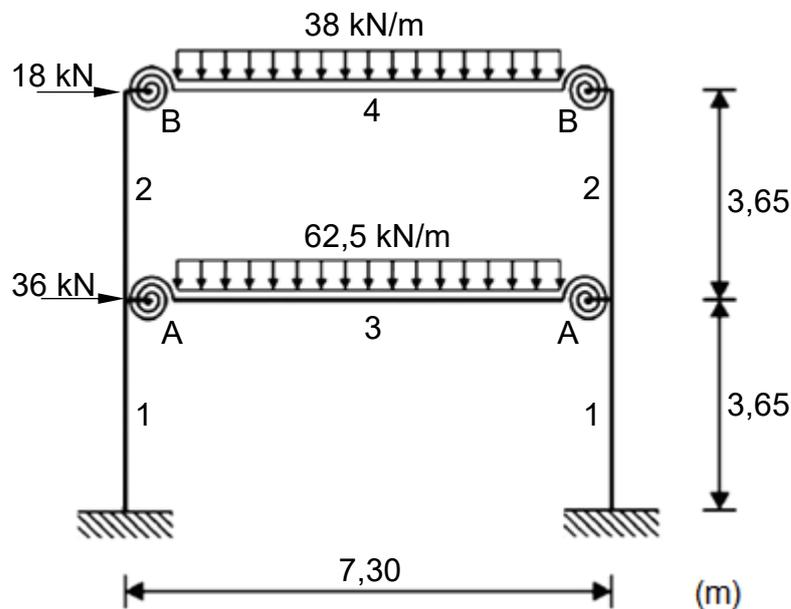


Figura 5.1: Pórtico plano P1v2a proposto por Simões (1996).

A estrutura foi escolhida por ser simples, logo rapidamente executada pelo algoritmo de otimização, e frequentemente citada na literatura, sendo assim, um ótimo teste inicial para validação e verificação dos códigos computacionais implementados.

Na Figura 5.1 pode-se observar a separação de grupos de otimização das barras (1, 2, 3 e 4) e das ligações (A e B). A figura ainda apresenta as dimensões da estrutura e a magnitude dos carregamentos.

No problema originalmente proposto por Simões (1996), o módulo de elasticidade do aço foi adotado como $E=206$ GPa. O processo de otimização deste autor busca os perfis comerciais ótimos para os pilares e vigas da estrutura além da rigidez ótima das ligações viga-pilar, que em sua pesquisa partiram de um grau de rigidez rotacional $r=0,9$. Para tanto foi utilizado um banco de dados com perfis no padrão IPE. A mesma estrutura foi implementada em Ferreira Júnior (2018) para a qual, o coeficiente de rigidez também variou livremente e foi utilizado o banco de dados de perfis comerciais da Gerdau. No presente trabalho, a implementação foi realizada de forma a otimizar os perfis estruturais e as ligações viga-pilar, sendo utilizado um banco de dados similar ao da pesquisa de Ferreira Júnior (2018).

5.1.1. Resultados e discussão

A Tabela 5.1 traz os valores obtidos para a massa do pórtico os trabalhos de Simões (1996), Ferreira Júnior (2018) e a presente pesquisa.

Tabela 5.1: Perfis ótimos para o pórtico P1v2a segundo as diferentes pesquisas.

Pesquisa	Grupo	Perfil	Massa linear (kg/m)	Massa (kg)	Massa total (kg)
Simões (1996)	1	IPE400	66,3	484,0	2114,1
	2	IPE400	66,3	484,0	
	3	IPE500	90,7	662,1	
	4	IPE400	66,3	484,0	
Ferreira Júnior (2018)	1	W 360 x 44,6	44,6	325,6	1814,8
	2	W 360 x 58,0	58,0	423,4	
	3	W 530 x 82,0	82,0	598,6	
	4	W 360 x 64,0	64,0	467,2	
Presente Trabalho	1	W 250 x 28,4	28,4	207,3	1674,6
	2	HP 200 x 53,0	53,0	386,9	
	3	W 610 x 82,0	82,0	598,6	
	4	W 530 x 66,0	66,0	481,8	

A massa de cada grupo do trabalho realizado por Simões (1996), apresentada na Tabela 5.1, foi calculada com o auxílio de tabelas de perfis no padrão IPE utilizado pelo autor. A massa dos grupos de elementos em Ferreira Júnior (2018) foi calculada com o mesmo banco de dados utilizado nesta pesquisa.

A tabela 5.2 apresenta os resultados decorrentes da otimização das ligações encontrados nas diversas pesquisas, sendo estas Simões (1996), Ferreira Júnior (2018) e a presente pesquisa.

Tabela 5.2: Ligações ótimas dimensionadas para o pórtico P1v2a segundo as diferentes pesquisas

Pesquisa	Grupo	d_p	t_p	$S_{j,ini}$ (kNm/rad)	Massa equivalente (kg)	Massa equivalente total (kg)
Simões (1996)	A	-	-	59000	62,94	237,70
	B	-	-	38000	55,91	
Ferreira Júnior (2018)	A	-	-	29426	53,03	227,94
	B	-	-	53015	60,94	
Presente Trabalho	A	30,0	12,5	55275	61,69	225,10
	B	24,0	8,0	22936	50,86	

Todos os valores de massa equivalente foram obtidos a partir dos valores de coeficiente de rigidez apresentados pelos autores das respectivas pesquisas com auxílio da equação (86).

Com os valores apresentados nas tabelas de 5.1 e 5.2 é possível o cálculo do custo total da estrutura em cada pesquisa. A Tabela 5.3 apresenta a comparação das massas obtidas em cada otimização.

Tabela 5.3: Resultados finais do pórtico P1v2a das diferentes pesquisas.

Referência Bibliográfica	Massa do pórtico (kg)	Massa equivalente das ligações (kg)	Massa total (kg)
Simões (1996)	2114,08	237,70	2351,78
Ferreira Júnior (2018)	1814,78	227,94	2042,72
Presente Trabalho	1674,62	225,10	1899,72

A comparação dos resultados apresentados na Tabela 5.3 demonstra a eficiência da metodologia de otimização sugerida nesta pesquisa, para a qual a estrutura obtida apresentou uma massa menor do que a literatura de referência. Para o exemplo mais simples proposto, cuja demanda computacional é a menor, a presente pesquisa encontrou o menor valor de massa do pórtico e massa relativa das ligações viga-pilar. Enquanto Simões (1996) otimizou a estrutura sem modificar as ligações durante o processo e Ferreira Júnior (2018) otimizou as ligações através da otimização da rigidez destas, a presente pesquisa dimensionou as ligações por meio do Método das Componentes. Essa consideração diferente pode ser um dos grandes motivos da diferença de resultados, já que o Método das Componentes do Eurocode 3 (CEN, 2011) provocam uma alteração nos valores de rigidez das ligações, influenciando a distribuição de cargas e custo final da estrutura.

A Figura 5.2 apresenta as restrições do projeto em relação à configuração ótima obtida.

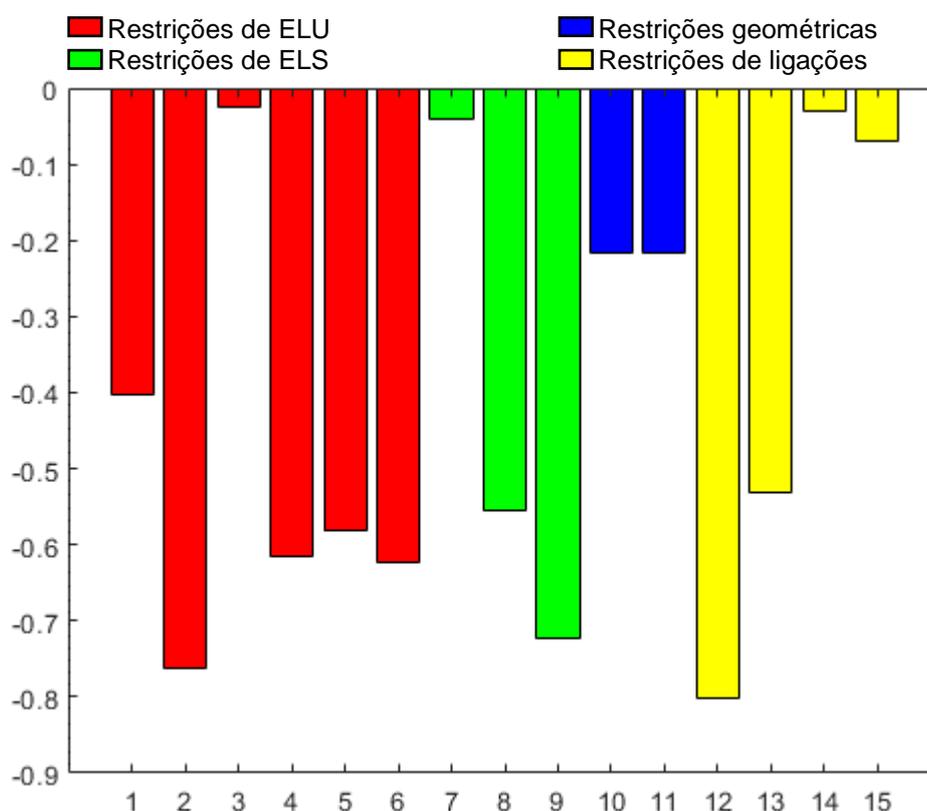


Figura 5.2: Restrições do problema do pórtico P1v2a.

Na Figura 5.2, as barras em vermelho representam as restrições de ELU de cada elemento estrutural, as barras verdes representam as restrições ELS da estrutura, as barras azuis representam as restrições geométricas do problema e as barras amarelas representam restrições associadas às ligações viga-pilar.

No estudo observou-se que a resistência e a rigidez inicial de uma ligação viga-pilar estão diretamente ligadas às dimensões da viga e do pilar que a compõem. Assim, para evitar que as alterações das dimensões dos elementos de viga e pilar torne a otimização das ligações divergente, as restrições de ligações também precisam representar um fator limitante do problema de otimização global. Nesse contexto as restrições de ligações viga-pilar são calculadas nos processos global e local de otimização, embora o dimensionamento destes elementos ocorra apenas na iteração local.

Pode-se determinar pela observação da Figura 5.2 que a restrição mais proeminente no processo global foi a 3^a, correspondente a uma limitação de Estado Limite Último do pórtico, enquanto a 14^a restrição foi a limitante no processo local de otimização.

A grande interferência das ligações no processo global de otimização também evidencia a importância do dimensionamento de ligações viga-pilar no estudo de otimização de estruturas. O processo de otimização levou um total de 107,61 segundos para encontrar o resultado apresentado. A Figura 5.2, em conjunto com as tabelas apresentadas, permite a compreensão de que o algoritmo se encontra devidamente implementado, apresentando resultados compatíveis com a realidade do problema e dimensionando estruturas capazes de suportar os esforços solicitantes incidentes.

5.2. Segunda implementação: Pórtico P3v2a

Cabrero e Bayo (2005) estudaram o problema de otimização de ligações semirrígidas ilustrado na Figura 5.3.

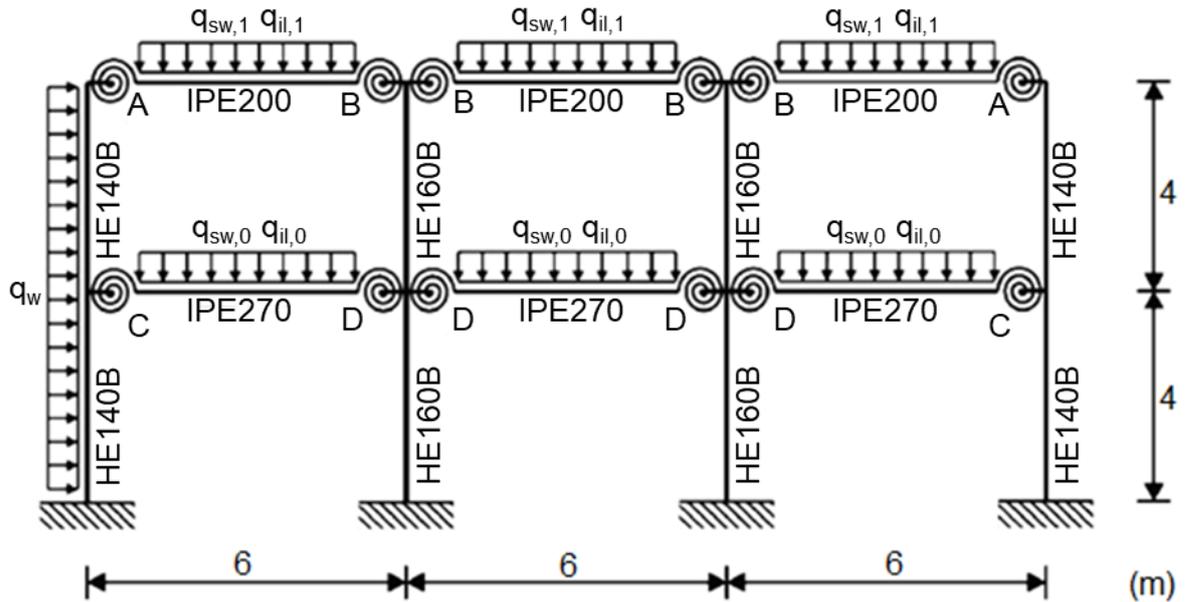


Figura 5.3: Pórtico plano P3v2a proposto por Cabrero e Bayo (2005).

Cabrero e Bayo (2005) adotaram um módulo de elasticidade do aço de 210 GPa e optaram pela não otimização dos perfis de vigas e pilares. A Tabela 5.4 apresenta os valores das cargas distribuídas consideradas pelos autores.

Tabela 5.4: Cargas distribuídas da segunda implementação (Cabrero e Bayo, 2005)

Carga	Magnitude (kN/m)
q_w	3,8
$q_{il,0}$	11,2
$q_{il,1}$	3,2
$q_{sw,0}$	7,8
$q_{sw,1}$	6,5

Desta forma, para efeitos de otimização, os autores agruparam as ligações em quatro grupos (A, B, C e D) apresentados na Figura 5.3, obtendo então a configuração apresentada na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Configuração de perfis estruturais proposta por Cabrero e Bayo (2005).

Ligação	Perfil da viga	Perfil do pilar
A	IPE200	HE140B
B	IPE200	HE160B
C	IPE270	HE140B
D	IPE270	HE160B

O mesmo problema foi otimizado por Sánchez-Olivares e Espín (2013). Os autores determinaram a otimização das ligações conforme Cabrero e Bayo (2005), mas realizaram ainda a otimização de perfis estruturais da estrutura aporticada. Para tanto, a estrutura foi dividida em quatro grupos. Foram considerados ainda perfis de padrão HEB para colunas, IPE para vigas e o dimensionamento das ligações viga-pilar em função dos valores de d_p e t_p na modelagem do problema. A Figura 5.4 representa a divisão de grupos de barras realizada no trabalho.

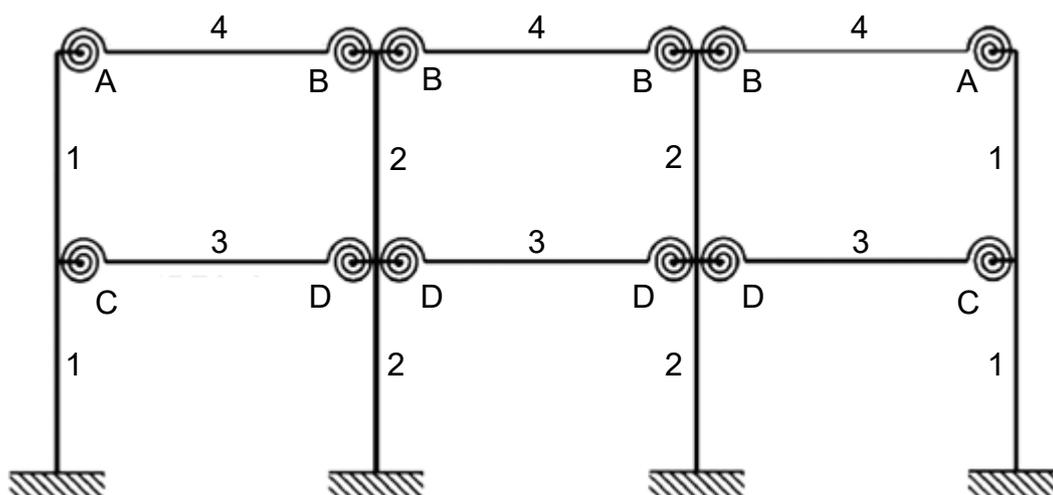


Figura 5.4: Grupos de elementos do pórtico P3v2a (Sánchez-Olivares e Espín, 2013).

O problema proposto foi também utilizado por Ferreira Júnior (2018), que optou por uma separação de grupos de ligações e elementos estruturais similar à de Sánchez-Olivares e Espín (2013). O autor, no entanto, decidiu por deixar de dimensionar as ligações, determinando apenas os valores de rigidez inicial $S_{j,ini}$ ótimos. Além disso, foi considerada a família de perfis estruturais W, mesmo banco de dados do presente trabalho.

A otimização aqui realizada apresenta a mesma distribuição de grupos de otimização das pesquisas citadas, tal como módulo de elasticidade e carregamentos similares. O problema proposto foi escolhido pela dimensão aumentada em relação à implementação anterior e pela ampla base bibliográfica com diferentes propostas para posterior comparação.

5.2.1.Resultados e discussão

A Tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos para os perfis estruturais do pórtico nas pesquisas de Cabrero e Bayo (2005), Sánchez-Olivares e Espín (2013), Ferreira Júnior (2018) e na presente pesquisa. Os valores obtidos para os trabalhos de Cabrero e Bayo (2005) e Sánchez-Olivares e Espín (2013) foram calculados com apoio das tabelas de perfis de padrão HEB e IPE necessários. Os demais valores foram calculados com o mesmo banco de dados utilizado na presente pesquisa.

A Tabela 5.7 apresenta os resultados obtidos em decorrência da otimização de ligações viga-pilar das pesquisas de Cabrero e Bayo (2005), Sánchez-Olivares e Espín (2013), Ferreira Júnior (2018) e a pesquisa descrita neste documento.

Tabela 5.6: Perfis ótimos para o pórtico P3v2a segundo as diferentes pesquisas.

Pesquisa	Grupo	Perfil	Massa linear (kg/m)	Massa (kg)	Massa total (kg)
Cabrero e Bayo (2005)	1	HE140B	33,7	539,2	2273,8
	2	HE160B	42,6	681,6	
	3	IPE270	36,1	649,8	
	4	IPE200	22,4	403,2	
Sánchez-Olivares e Espín (2013)	1	HE120B	26,7	427,4	2421,7
	2	HE160B	42,6	681,8	
	3	IPE300	42,2	759,8	
	4	IPE240	30,7	552,8	
Ferreira Júnior (2018)	1	W 150 x 22,5	22,5	360,0	2327,6
	2	W 200 x 35,9	35,9	574,4	
	3	W 310 x 38,7	38,7	696,6	
	4	W 310 x 38,7	38,7	696,6	
Presente Trabalho	1	W 200 x 19,3	19,3	308,8	1638,2
	2	W 200 x 19,3	19,3	308,8	
	3	W 410 x 38,8	38,8	698,4	
	4	W 250 x 17,9	17,9	322,2	

Tabela 5.7: Valores da otimização de ligações para o pórtico P3v2a segundo as diferentes pesquisas.

Pesquisa	Grupo	d_p	t_p	$S_{j,ini}$ (kNm/rad)	Massa equivalente (kg)	Massa equivalente total (kg)
Cabrero e Bayo (2005)	A	22,0	15,0	-	-	317,30
	B	22,0	14,0	-	-	
	C	20,0	10,0	-	-	
	D	16,0	12,0	-	-	
Sánchez-Olivares e Espín (2013)	A	16,0	8,0	-	-	1229,05
	B	20,0	15,0	-	-	
	C	12,0	12,0	-	-	
	D	16,0	10,0	-	-	
Ferreira Júnior (2018)	A	-	-	10211	46,60	441,12
	B	-	-	12037	47,21	
	C	-	-	30077	53,25	
	D	-	-	16148	48,59	
Presente Trabalho	A	22,0	6,3	7717	45,76	573,67
	B	16,0	8,0	11770	47,12	
	C	20,0	6,3	12715	47,44	
	D	20,0	6,3	19472	49,70	

A Tabela 5.7 apresenta os resultados do trabalho de Ferreira Júnior (2018). O autor optou por otimizar o valor do coeficiente de rigidez sem dimensionar as ligações, o que justifica a ausência dos valores de d_p e t_p deste trabalho.

Os trabalhos de Cabrero e Bayo (2005) e Sánchez-Olivares e Espín (2013), apresentados na Tabela 5.7, não apresentam os valores de coeficiente de rigidez das ligações ($S_{j,ini}$). A ausência destes valores impossibilitou o cálculo da massa equivalente das ligações para a estimativa de preço conforme a equação (86). Ambas as pesquisas, no entanto, fornecem informações suficientes para que se possa estimar o valor do somatório da massa equivalente de todas as ligações.

O trabalho de Cabrero e Bayo (2005) informa que o preço total do aço utilizado no pórtico foi de 3619,50 euros, mas não informa qual é o preço do quilo de aço no momento de sua realização. A Tabela 5.6 demonstra que a estrutura aporticada desta pesquisa tem uma massa total de 2273,8 kg. Assim, dividindo o valor do pórtico pela massa obtém-se o valor do aço em 1,59 euros/kg. O artigo apresenta ainda o valor total para a realização das ligações como sendo 505,08 euros. A divisão do valor das ligações pelo preço do quilo do aço estabelece que a soma das massas equivalentes dos resultados obtidos por Cabrero e Bayo (2005) é de 317,30 kg.

O Trabalho de Sánchez-Olivares e Espín (2013) estabelece que o pórtico tem um custo total (custo de estrutura e ligações somados) de 5841,20 euros, com uma estrutura aporticada de 2421,70 kg e o custo do aço estabelecido em 1,60 euros/kg. A multiplicação do valor do aço pela massa do pórtico estabelece um custo de 3874,72 euros, sendo a diferença de 1966,48 euros referente à execução das ligações vigapilar. Assim, dividindo o custo total das ligações pelo preço do aço, encontra-se uma massa equivalente total para o problema de 1229,05 kg. Apesar de muito expressivo e distante dos demais valores apresentados, o valor encontrado é compatível com a literatura.

Com todos estes valores devidamente estabelecidos é possível o cálculo do custo total da estrutura a partir dos resultados apresentados em cada pesquisa. A Tabela 5.8 traz a comparação das massas obtidas em cada otimização.

Tabela 5.8: Resultados encontrados para o pórtico p3v2a nas diferentes pesquisas.

Referência Bibliográfica	Massa do pórtico (kg)	Massa equivalente das ligações (kg)	Massa total (kg)
Cabrero & Bayo (2005)	2273,80	317,30	2591,10
Sánchez-Olivares & Espín (2013)	2421,70	1229,05	3650,75
Ferreira Júnior (2018)	2327,60	441,12	2768,72
Presente Trabalho	1638,20	573,67	2211,87

A comparação dos resultados apresentados na Tabela 5.8 reforçam as constatações advindas da primeira implementação.

A pesquisa de Cabrero e Bayo (2005) consegue apresentar a menor de todas as massas equivalentes das ligações, no entanto não resulta na estrutura de menor massa total. Este é mais um argumento sobre a importância da otimização de ambos o pórtico e as ligações: a comparação direta com o atual trabalho demonstra que a diminuição da massa do pórtico pode ser acompanhada da necessidade do aumento do custo das ligações, trazendo resultados piores na massa equivalente das ligações, mas ainda assim uma estrutura de menor custo.

A pesquisa de Sánchez-Olivares e Espín (2013) é a única além da presente pesquisa que otimizou as ligações viga-pilar dimensionando-as, sendo todos os parâmetros calculados em função de d_p e t_p . Além disso, a pesquisa também se propôs a utilizar o modelo de massa equivalente como função objetivo da otimização das ligações semirrígidas. Apesar das similaridades, ambas as pesquisas apresentaram resultados extremamente diferentes. Considerando que a principal diferença entre os trabalhos é a utilização do modelo de otimização em duas etapas, a comparação direta de ambas ajuda a estabelecer a qualidade do algoritmo utilizado e a validade das considerações adotadas.

O presente trabalho apresentou massa total mais baixa que a apresentada por Ferreira Júnior (2018). As diferenças se devem às considerações que não foram adotadas em ambas pesquisas, como a consideração de dimensionamento de ligações e a otimização realizada de forma multinível.

A Figura 5.5 apresenta as restrições de projeto na configuração ótima obtida para o pórtico P3v2a.

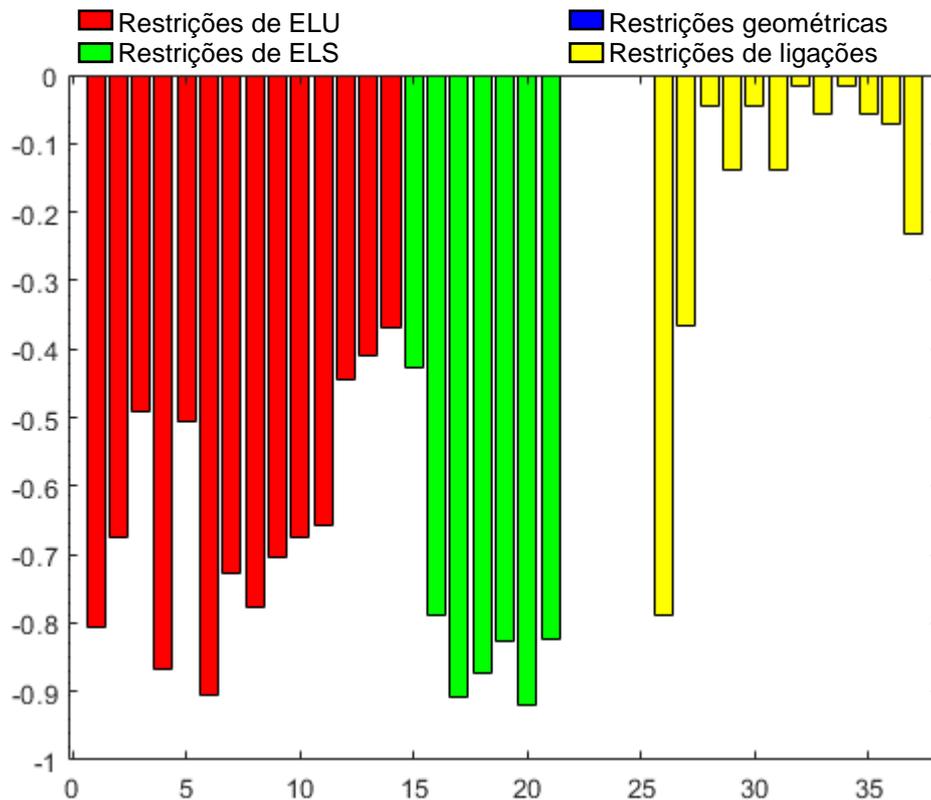


Figura 5.5: Restrições da otimização do pórtico P3v2a.

Na Figura 5.5, as barras em vermelho representam as restrições de resistência de cada elemento estrutural, as barras verdes representam as restrições de deslocamentos máximos da estrutura e as barras amarelas representam o conjunto de restrições da otimização das ligações viga-pilar. As restrições 22, 23, 24 e 25, trecho no qual o gráfico não apresenta nenhuma barra, são as restrições dimensionais impostas, que apresentaram um valor igual a zero. Este conjunto de restrições traz como valor a razão entre dimensões de pilares consecutivos, da qual subtrai-se 1. Assim, casos em que pilares consecutivos sejam iguais retornam zero como resposta. Casos em que pilares possuam seção superior menor que a inferior, retornam um valor negativo. Casos em que pilares apresentem seção superior maior que a inferior, resultam em valores superiores a um e conseqüente violação de restrições. Considerando que os pilares consecutivos entre pavimentos foram colocados nos

mesmos grupos de otimização, conforme ilustrado na Figura 5.4, este conjunto de restrições zeradas é condizente com a realidade do problema.

A análise da Figura 5.5, tal como das tabelas 5.6 a 5.8, mostra que o problema está devidamente implementado e a estrutura dimensionada é capaz de responder as solicitações com custo mínimo possível. O processo de otimização levou um total de 430,15 segundos. O algoritmo realizou o cálculo de função objetivo e restrições de projeto 7529 vezes em nível global e 1008 vezes em nível local. A otimização ocorreu em 9 ciclos do processo iterativo. Em comparação, Ferreira Júnior (2018) encontrou seus resultados em 65 segundos após 48 gerações.

5.3. Terceira implementação: Pórtico P3v10a

Sánchez-Olivares e Espín (2013) propuseram o problema de otimização ilustrado pela Figura 5.6:

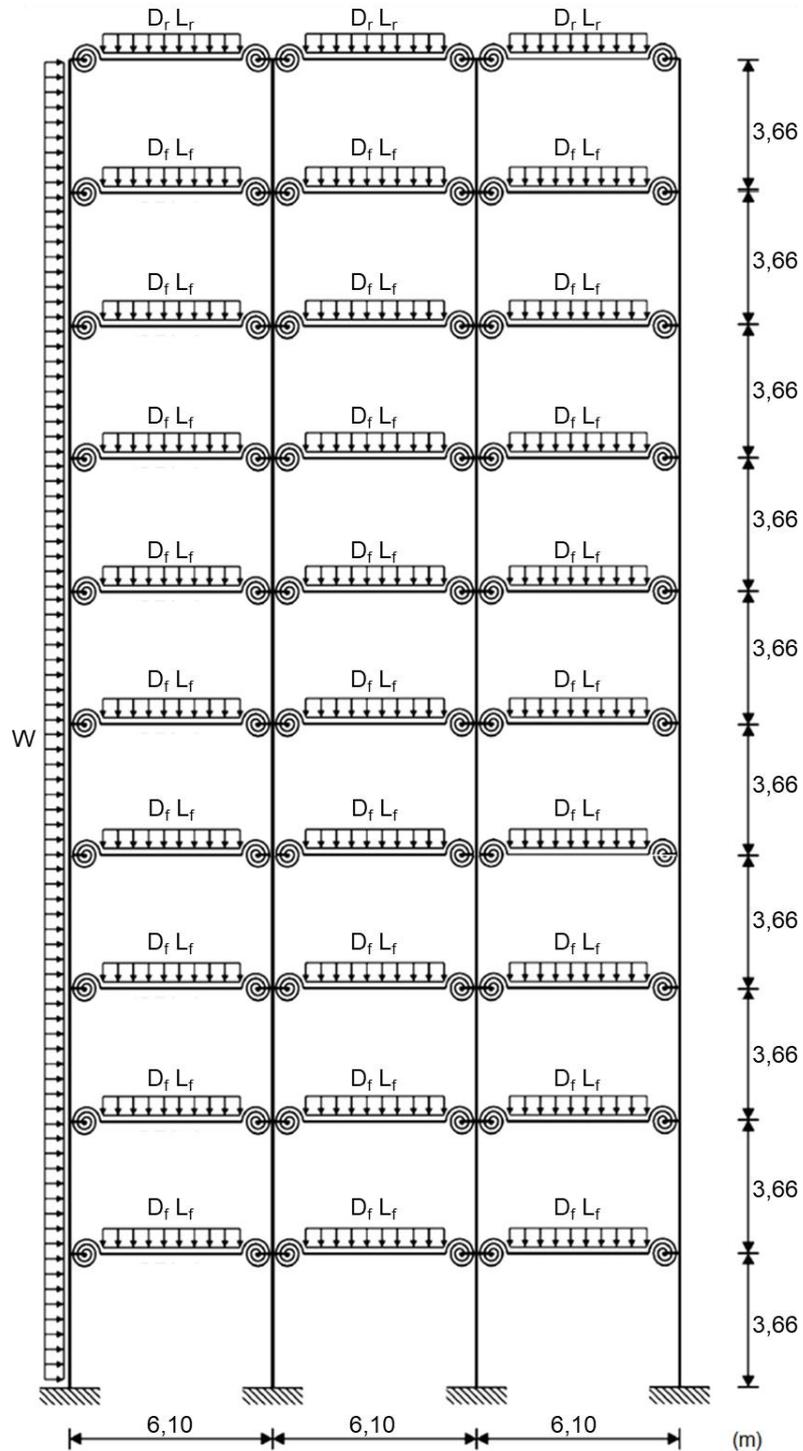


Figura 5.6: Pórtico P3v10a proposto por Sánchez-Olivares e Espín (2013)

Para a estrutura apresentada, foi considerado um módulo de elasticidade de 210 MPa e os carregamentos conforme a Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Cargas distribuídas do pórtico P3v10a (Sánchez-Olivares e Espín, 2013).

Cargas (kN/m)				
W	D _f	L _f	D _r	L _r
6,57	30,66	35,04	20,58	8,76

O trabalho em consideração definiu ainda dois estados de carga para os quais a estrutura seria otimizada, conforme as equações (89) e (90).

$$1D_f + 1D_r + 0,4L_f + 0,4L_r + 0,5W \quad (89)$$

$$1,2D_f + 1,2D_r + 0,5L_f + 0,5L_r + 1,3W \quad (90)$$

Neste contexto Sánchez-Olivares e Espín realizaram a otimização de elementos estruturais e ligações viga-pilar em etapa única e com a utilização de um algoritmo genético com a consideração de dez subpopulações. A distribuição de grupos de elementos otimizados se ilustra nas figuras 5.7 e 5.8.

A implementação do presente trabalho considerou o estado de carga demonstrado na equação (90), visto que este atingiria valores mais críticos. A otimização se manteve multinível e sem a consideração de subpopulações, conforme realizado nas implementações anteriores. A distribuição de grupos de otimização considerada foi a mesma relatada na bibliografia, tal como o módulo de elasticidade do aço. O problema foi escolhido por ser uma estrutura de grandes dimensões e por ser apresentada em uma referência bibliográfica com uma implementação muito semelhante, em vários aspectos, ao trabalho aqui descrito.

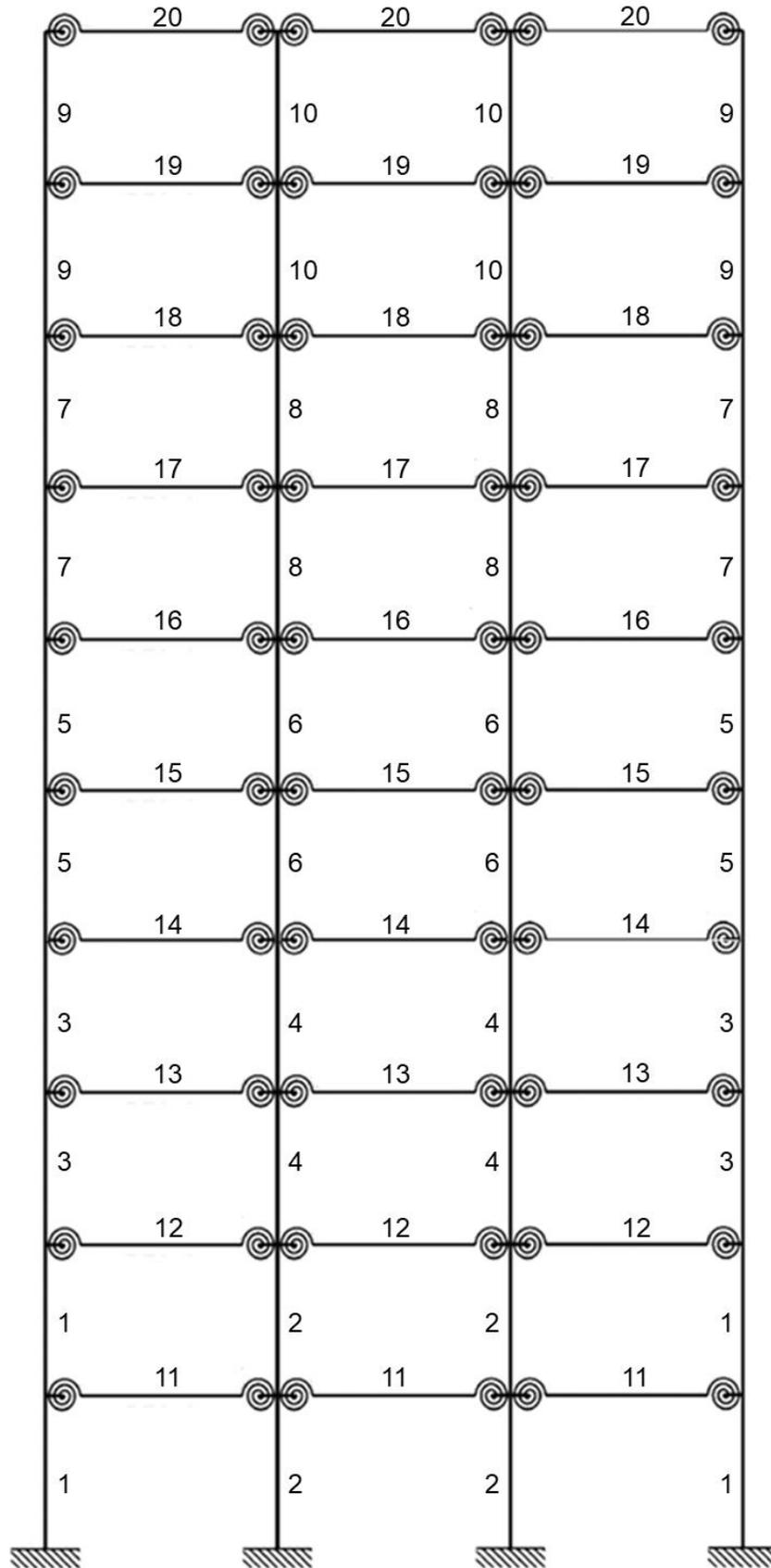


Figura 5.7: Grupos de otimização de perfis do pórtico P3v10a (Sánchez-Olivaes e Espín, 2013).

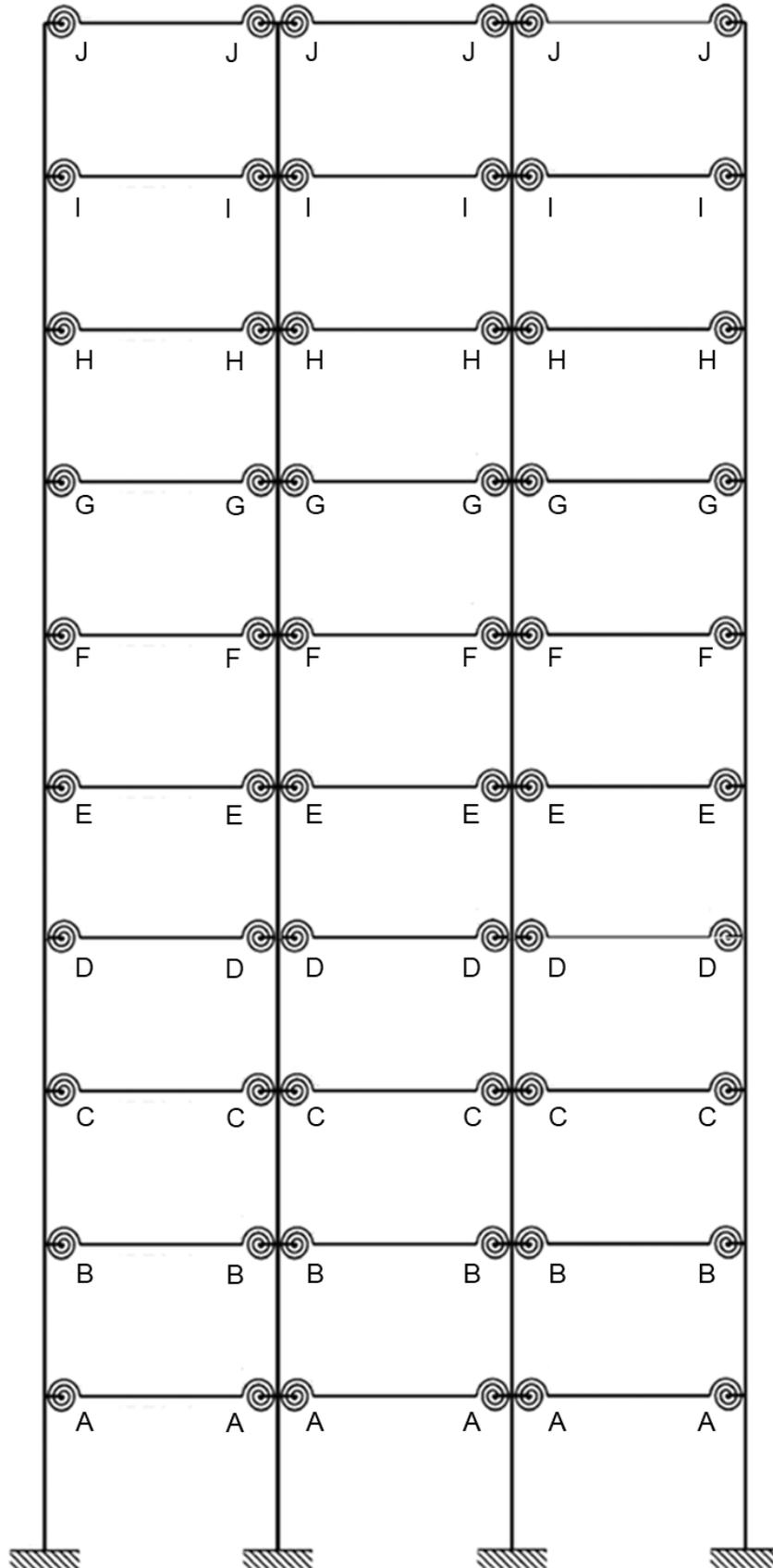


Figura 5.8: Grupos de otimização de ligações do pórtico P3v10a (Sánchez-Olivaes e Espín, 2013).

5.3.1. Resultados e discussão

As tabelas a seguir apresentam, lado a lado, os resultados obtidos na pesquisa realizada por Sánchez-Olivares e Espín (2013) e no presente trabalho, trazendo a Tabela 5.10 os resultados de perfis comerciais obtidos e a Tabela 5.11 os resultados das dimensões d_p e t_p das ligações viga-pilar.

Tabela 5.10: Perfis comerciais do pórtico P3v10a para a pesquisa de Sánchez-Olivares e Espín (2013) e o presente trabalho.

Grupo	Sánchez-Olivares & Espín (2013)	Presente Trabalho
1	HEB320	W 610 x 113,0
2	HEB800	W 610 x 174,0
3	HEB300	W 610 x 101,0
4	HEB450	W 610 x 155,0
5	HEB260	W 530 x 92,0
6	HEB340	W 610 x 101,0
7	HEB220	W 610 x 82,0
8	HEB260	W 530 x 85,0
9	HEB180	W 530 x 85,0
10	HEB180	W 460 x 106,0
11	IPE400	W 610 x 82,0
12	IPE400	W 610 x 92,0
13	IPE450	W 610 x 92,0
14	IPE450	W 530 x 109,0
15	IPE400	W 610 x 82,0
16	IPE500	W 610 x 82,0
17	IPE400	W 610 x 125,0
18	IPE450	W 530 x 123,0
19	IPE360	W 610 x 82,0
20	IPE300	W 610 x 82,0

Tabela 5.11: Dimensões de ligação viga-pilar do pórtico P3v10a para a pesquisa de Sánchez-Olivares e Espín (2013) e o presente trabalho.

Grupo	Sánchez-Olivares & Espín (2013)		Presente Trabalho	
	d_p (mm)	t_p (mm)	d_p (mm)	t_p (mm)
A	24	20	27	16
B	24	25	36	12,5
C	24	25	36	12,5
D	24	25	33	12,5
E	24	25	33	12,5
F	20	20	33	12,5
G	22	20	27	12,5
H	22	15	24	12,5
I	22	20	22	12,5
J	16	15	24	6,3

Sánchez-Olivares e Espín (2013) não divulgaram os valores de massa equivalente encontrados em cada ligação, mas a pesquisa traz os valores da massa dos perfis escolhidos e o valor unitário do aço. Assim, a massa equivalente das ligações foi calculada em processo análogo ao utilizado para o pórtico P3v2a. Com um custo total da estrutura de 59963,90 euros, um custo do aço de 1,60 euros/kg e uma massa total de perfis de 29733,9 kg, a massa equivalente das ligações encontrada foi de 7744,24 kg. A Tabela 5.12 apresenta os valores encontrados a partir de Sánchez-Olivares e Espín (2013) e pelo presente trabalho para massa dos perfis, massa equivalente das ligações e massa total da estrutura.

Tabela 5.12: Resultados encontrados para o pórtico P3v10a na pesquisa de Sánchez-Olivares e Espín (2013) e no presente trabalho.

Referência Bibliográfica	Massa do pórtico (kg)	Massa equivalente das ligações (kg)	Massa total (kg)
Sánchez-Olivares & Espín (2013)	29733,90	7744,24	37478,14
Presente Trabalho	33419,46	3957,10	37376,56

A comparação dos valores apresentados pela Tabela 5.12 permite aferir mais uma vez a qualidade do código implementado tal como dos resultados obtidos pelo modelo proposto. O presente trabalho foi capaz de encontrar uma estrutura mais leve mesmo considerando uma versão mais simples de algoritmo genético, sem a consideração

de subpopulações. Pode-se observar que o algoritmo priorizou a diminuição da massa das ligações viga-pilar, gerando uma estrutura com peso de perfis superior ao da referência bibliográfica, compensando tal diferença com ligações muito mais leves. Tal observação representa um comportamento contrário ao da implementação P3v2a com relação à pesquisa de Cabrero e Bayo (2005), em que o código aumentou o custo das ligações para diminuir a massa total dos elementos estruturais. A diferença permite aferir que o código implementado não está viciado ou enviesado para uma sequência análoga de otimização, mas de fato procura resultados de maneiras diferentes, o que demonstra mais uma vez sua robustez.

A Figura 5.9 apresenta as restrições de projeto obtidas para a configuração ótima do pórtico P3v10a.

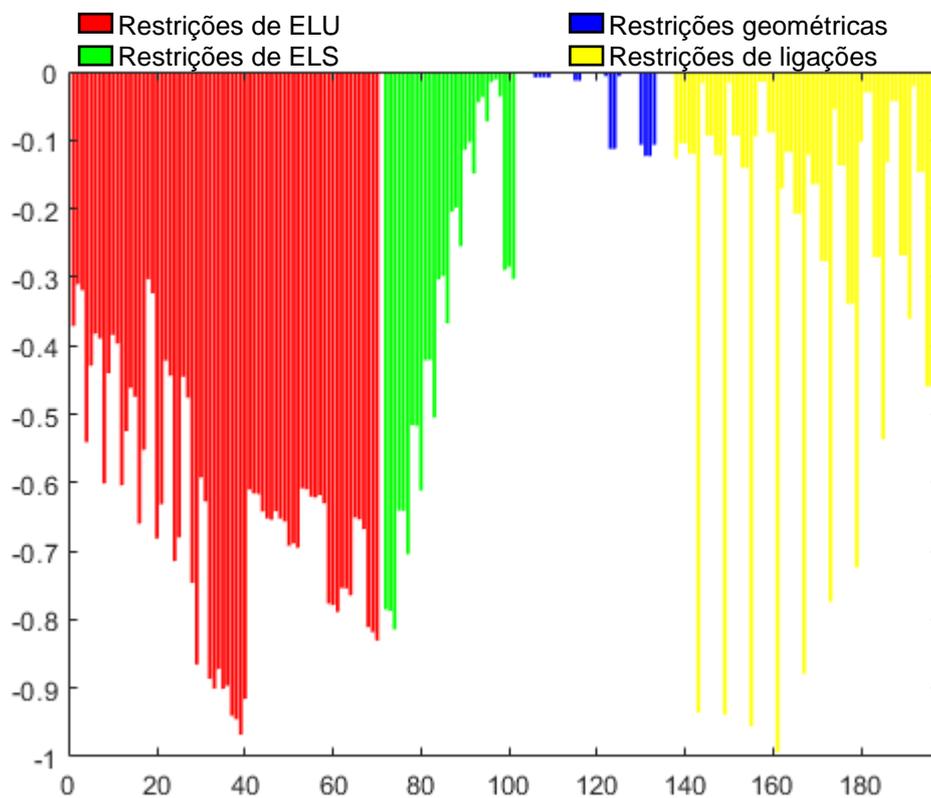


Figura 5.9: Restrições da otimização do pórtico P3v10a.

A Figura 5.9 traz um gráfico de barras em que cada barra representa uma das 197 restrições que integraram o problema do pórtico P3v10a. As barras em vermelho representam todas as restrições associadas ao Estado Limite Último do problema proposto. É interessante notar que todas as restrições foram devidamente

respeitadas. As restrições de esforços da extrema esquerda representam o ELU das colunas da base da estrutura, à medida que se avança para a direita, observam-se as restrições das colunas superiores até que, nas últimas barras vermelhas do gráfico, encontrem-se representadas as restrições das vigas. Pode-se notar que as colunas inferiores tendem a ter suas restrições menos respeitadas, sendo as restrições cada vez mais obedecidas à medida que subimos a estrutura. Como os carregamentos tendem a ter valores menores no topo da estrutura e aumentar nos pilares mais próximos às fundações, o comportamento está conforme esperado. As barras verdes ilustram as restrições do Estado Limite de Serviço, que foram respeitadas. Também conforme esperado, pode-se verificar que as colunas da base da estrutura respeitam mais estas restrições, sendo os deslocamentos mais críticos vistos nos pilares superiores da edificação. As barras azuis representam as restrições construtivas, necessárias para viabilidade da estrutura. O maior valor encontrado neste conjunto de restrições foi zero, demonstrando total respeito à esta consideração. As barras amarelas representam as restrições das ligações viga-pilar. Todos os valores foram devidamente respeitados conforme ilustrado na Figura 5.9. Há, todavia, uma grande discrepância entre alguns valores apresentados. Algumas ligações tiveram suas dimensões ditadas pelo grupo que as incluíam, obtendo momentos resistentes muito aquém das solicitações. A Figura 5.9 revela que as restrições críticas foram restrições construtivas, de ligações e de ELS.

O conjunto de resultados apresentados nas tabelas 5.10, 5.11 e 5.12, tal como na Figura 5.9, cumprem o papel de reforçar a robustez do algoritmo proposto e implementado tal como dos resultados dele vindos. Devido às grandes dimensões da estrutura o processo de otimização levou um total de 90652 segundos, aproximadamente 25 horas, executando o conjunto de equações de restrições e função objetivo um total de 376012 vezes para o problema global de otimização e 3375 vezes para o problema local, num total de 12 ciclos iterativos.

6. Considerações Finais

A pesquisa objetivou a implementação de um algoritmo bi-nível de otimização de pórticos planos com ligações semirrígidas. Os níveis implementados para tanto foram denominados o nível global de otimização, que busca os perfis estruturais ótimos de vigas e pilares, e o nível local, utilizado para encontrar os valores ótimos de diâmetro de parafuso e espessura de chapa de extremidade de ligações viga-pilar. O nível global utilizou-se de análise estrutural não-linear, aproximando os modelos computacionais do comportamento estrutural real. O nível local foi implementado de forma a viabilizar o dimensionamento de ligações rígidas, flexíveis ou semirrígidas, estas conforme o Eurocode 3 (CEN, 2011), aumento o número de possíveis resultados para o sistema e aproximando os modelos computacionais às ligações viga-pilar reais. A implementação foi feita em ambiente MATLAB® por meio de quarenta módulos computacionais diferentes.

O algoritmo desenvolvido é capaz de atender aos objetivos inicialmente propostos, realizando otimização por meio de dois níveis de otimização (global e local). Para tanto, houve a utilização do algoritmo genético. O código ainda é capaz de considerar ligações como rígidas e flexíveis, explorando melhor o espectro de possibilidades. O algoritmo foi todo escrito e separado em módulos computacionais, resultando em quarenta programas de uso específico que podem futuramente ser aproveitados em outros projetos de otimização.

As aplicações computacionais para validação dos módulos de análise estrutural e de ligações foram implementadas com sucesso, apresentando resultados condizentes com a bibliografia e realidade do problema.

As aplicações estruturais foram feitas com êxito e serviram para auxiliar na contínua melhoria do código desenvolvido. O pórtico P1v2a, apresentado no item 5.1, foi bem sucedido, demonstrando a robustez da metodologia proposta, com uma redução da massa total da estrutura de 7% com relação ao melhor resultado encontrado na bibliografia de referência. O pórtico P3v2a, apresentado no item 5.2, reforçou as conclusões da aplicação anterior, com uma massa total 14,6% abaixo do melhor resultado visto na referência. O pórtico P3v10a, apresentado no item 5.3, provou a consistência do algoritmo, neste exemplo utilizado num problema muito

maior que os anteriores. Nesta última aplicação, o algoritmo provou-se robusto mais uma vez, com uma massa total 0,27% menor que a da referência. Em suma, as aplicações realizadas servem para reforçar o sucesso do algoritmo implementado e promissor resultado que pode ser advindo da linha de pesquisa adotada.

Por fim, era esperado que a separação do problema de otimização em dois níveis pudesse gerar um ganho de eficiência computacional. Dentro da bibliografia explorada, o único trabalho que fornece informações suficientes para tal comparação da eficiência é o realizado por Ferreira Júnior (2018) para o pórtico P3v2a. A comparação dos dois resultados indica um tempo de processamento computacional mais do que cinco vezes maior do algoritmo bi nível. A diferença pode ser resultado de considerações feitas para otimização ou no código escrito. Vale ressaltar que a complexidade do problema de otimização aumenta exponencialmente com o tamanho da estrutura. Testar todas as possíveis estruturas para o problema do pórtico P3v2a, por exemplo, significaria calcular $4,35E16$ diferentes estruturas, enquanto para o problema do pórtico P3v10a seriam $7,78E71$. Assim, é possível que a consideração multinível represente um aumento de eficiência para sistemas mais complexos, para os quais uma otimização mais direta precisa encontrar a estrutura ótima num número muito maior de possibilidades. A falta de bibliografia para comparação deste tipo de problema, no entanto, não permite chegar a conclusões deste gabarito.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

Considerando os estudos realizados e os resultados obtidos, futuros trabalhos na área podem ter um foco voltado para o aumento da eficiência do código computacional. Uma alternativa é buscar uma relação entre as restrições globais e locais mais imediata. Se desenvolvida uma relação direta entre ambos, é possível limitar o problema global pelo banco de dados em vez de verificar a resistência das ligações em toda iteração do nível global. Outra possibilidade é a consideração de outros algoritmos de otimização que não o genético ou a adição de considerações ao algoritmo genético, como múltiplos objetivos ou subpopulações. Outras formas de análise estrutural e considerações de dimensionamento, capazes de simplificar

cálculos e agilizar o código, também seriam bem-vindas. Mais pesquisas com o método aqui desenvolvido, mas especificamente voltadas para certificar a eficiência computacional do algoritmo, mesmo sem modificações, também seriam uma boa alternativa.

Caso a opção seja buscar estruturas mais leves com uma estratégia parecida, há a opção de considerar um comportamento semirrígido nas ligações pilar-fundação. Outros tipos de ligação viga-pilar também podem ser estudados e, conseqüentemente, trazer novas possibilidades de solução para as estruturas estudadas.

7. Referências Bibliográficas

AUSTRELL, P. E., DAHLBLOM, O., LINDEMANN, J., OLSSON, A., OLSSON, K. G., PERSSON, K., PETERSSON, H., RISTINMAA, M., SANDBERG, G., WERNBERG, P. A., (2004) *Calfem: A finite element toolbox to Matlab V3.4*. Lund, Sweden: Lund University.

ALBERDI, R., KHANDELWAL, K., 2015, Comparison of robustness of metaheuristic algorithms for steel frame optimization. *Engineering Structures*, 102(2015):40-60.

ALBERDI, R., MURREN, P., KHANDELWAL, K., 2015, Connection topology optimization of steel moment frames using metaheuristic algorithms. *Engineering Structures*, 100(2015):276-292.

ARORA, J. S. (2012) *Introduction to optimum design*. 3. ed. Iowa City: Elsevier.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2008) *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios: NBR 8800*. Rio de Janeiro.

CABRERO, J.M., BAYO, E., 2005, Development of practical design methods for steel structures with semirigid connections. *Eng Struct*, 27:1125-1137.

CAMP, C. V., BICHON, B. J., STOVALL, S. P., 2005, Design of Steel Frames Using Ant Colony optimization. *Journal of Structural Engineering*, 131(3):369-379.

CARVALHO, L. C. V., ANDRADE, S. A. L., VELLASCO, P. C. G. S., 1998, Experimental Analysis of Bolted Semi-Rigid Connections. *Journal of Constructional Steel Research*, Londres, 46(1-3):1-20.

CHEN, W. F. (2000) *Practical Computer-Based Analysis for Semi-Rigid Steel Frames*. Singapura: World Scientific.

DEGERTEKIN, S. C., HAYALIOGLU, M. S., 2010, Harmony search algorithm for minimum cost design of steel frames with semi-rigid connections and column bases. *Struct Multidisc Optim*, 42:755-768.

DENG, X. (1998) *Multilevel Optimization: Algorithms and Applications*. Chapter 9: Complexity issues in bilevel linear programming. 1. ed., The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

DÍAZ, C., VICTORIA, M., QUERIN, O. M., MARTÍ, P., 2012, Optimum design of semi-rigid connections using metamodels. *Journal of Constructional Steel Research*, Londres, 78:97-106.

European Committee for Standardization – CEN (2005) Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings: EN 1993-1-1 (EC3-1-1:2005), Eurocode 3. Bruxelas.

European Committee for Standardization – CEN (2011) Design of steel structure. Part 1.8: design of joints: EN 1993-1-8 (EC3-1-8:2011), Eurocode 3. Bruxelas.

FAELLA, C., PILUSO, V., RIZZANO, G. (2000) Structural Steel Semi-Rigid Connections: *Theory, Design and Software*. 1. ed. Boca Raton: CRC Press. 536 p.

FALCÓN, G. A. S., MONTRULL, P. M., 2014, Dimensionamento ótimo de ligações semirrígidas de porticos de aço – modelo “Pórtico Auxiliar”. *Congresso Latino-Americano da Construção Metálica*, São Paulo.

FERREIRA JÚNIOR, S. S. (2018) Projeto ótimo de pórticos de aço com ligações semirrígidas utilizando algoritmos genéticos e elementos finitos híbridos. Dissertação (Mestrado) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.

FIGUEIREDO, L. M. (2004) Ligações Mistas Viga-pilar: Análise Teórica e Experimental. Dissertação (Mestrado) – São Carlos – SP, Universidade de São Paulo – USP.

GIL-MARTÍN, L. M., HERNÁNDEZ-MONTES, E., 2019, A compact and simpler formulation of the component method for steel connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 164(2020):1-9.

GREINER, D., EMPERADOR, J. M., WINTER, G., 2004, Single and multiobjective frame optimization by evolutionary algorithms and the auto-adaptive rebirth operator. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193(2004):3711-3743.

HORTENCIO, R. S., FALCÓN, G. A. S., 2018, Optimal design of beam-column connections of plane steel frames using the component method. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 15(11): e68.

KAMESHKI, E. S., SAKA, M. P., 2001, Optimum design of nonlinear steel frames with semi-rigid connections using a genetic algorithm. *Computer & Structures*, 79:1593-1604.

KAMESHKI, E. S., SAKA, M. P., 2003, Genetic algorithm based optimum design of nonlinear planar steel frames with various semirigid connections. *journal of constructional steel research*, 59(2003):109-134.

KISHI, N., CHEN, W. F., GOTO, Y., 1997, Effective Length Factor of Columns in Semirigid and Unbraced Frames. *Journal of Structural Engineering*, 123:313-320.

LEAL, L. A. A. S. (2014) Análise elástica dos efeitos da não-linearidade geométrica em estruturas de aço. Dissertação (Mestrado) – São Paulo – SP, Universidade de São Paulo – USP.

LIMA, L. R. O. (2003) Comportamento de ligações com placa de extremidade em estruturas de aço submetidas a momento fletor e força axial. Tese (Doutorado) – Rio de Janeiro – RJ, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio.

MOSQUERA, J. C., GARGOUM, L. A., 2014, A sequential algorithm for minimum weight design of 2-D steel portal frames using Eurocode 3. *International Journal of Steel Structures*, 14(1):141-149.

MURREN, P., KHANDELWAL, K., 2013, Design-driven harmony search (DDHS) in steel optimization. *Engineering Structures*, 59(2014):798-808.

OLIVEIRA, P. C. G. P. (2019) Dimensionamento ótimo de pórticos em aço com ligações semirrígidas considerando análise não linear geométrica. Dissertação (Mestrado) Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.

PFEIL, W., PFEIL, M., (2009) Estruturas de aço: dimensionamento prático. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC.

RAMIRES, F. B., ANDRADE, S. A. L., VELLASCO, P. C. G. S., LIMA, L. R. O., 2012, Genetic algorithm optimization of composite and steel endplate semi-rigid joints. *Engineering Structures*, 45(2012):177-191.

RANGEL, J. V. S. (2018) Dimensionamento ótimo de pórticos planos de aço com ligações semirrígidas considerando análise não-linear geométrica. Dissertação (Mestrado) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.

SAKALKAR, V., HAJELA, P., 2010, Multilevel decomposition based nondeterministic design optimization for structural systems. *Advances in Engineering Software*, 42(2011):1-11.

SÁNCHEZ-OLIVARES, G., ESPÍN, A.T., 2013, Design of planar semi-rigid steel frames using genetic algorithms and component method. *Journal of Constructional Steel Research*, 88(2013):267-278.

SANTOS, M. (2016) Projeto ótimo de pórticos de aço utilizando perfis comerciais e algoritmos genéticos. Dissertação (Mestrado) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.

SIMÕES, L. M. C., 1996, Optimization of frames with semi-rigid connections. *Computers and Structures*, 60:531-539.

SOUZA, Y. P., FERREIRA, W. G., FERREIRA, L. D., GONÇALVES, V. F., CAMARGO, R. S., NETO, A. B., LECCHI, L. B. (2019) Introdução à teoria da estabilidade elástica: *conceitos, implementações computacionais e aspectos normativos*. 3. ed. 1. reimpressão, Vitória: LBF.

APÊNDICE 1 – MÓDULOS COMPUTACIONAIS IMPLEMENTADOS

O algoritmo foi dividido em quarenta diferentes trechos de código denominados de funções dentro do ambiente MATLAB®. Estas foram classificadas em cinco categorias diferentes: Funções de análise estrutural (AE), restrições do pórtico (FRP), restrições das ligações (FRL), otimização estrutural (OE) e funções pertencentes ao programa principal (Fun). A classificação das funções implementadas é condizente com a etapa em que são utilizadas e o método pelo qual são utilizadas. Um exemplo desta organização é: A função Fun_OtimizarEstrutura é responsável por organizar e realizar todo o ciclo iterativo dos níveis global e local. No entanto, como é chamada pelo programa principal PP_Otim_Port_SRC_Multi, ela é classificada como uma função pertencente ao programa principal (Fun). Dessa forma, pode-se dizer que a classificação das funções não diz respeito ao trabalho que o algoritmo nela escrito executa, mas sim à de que etapa esta é uma subfunção, isto é, para qual etapa do processo de otimização ela é essencial.

Foram implementadas nove funções AE, nove funções FRP, duas funções FRL, treze funções OE, seis funções Fun e o programa principal PP_Otim_Port_SRC_Multi. Os itens contidos nessa seção trazem breves descrições de cada uma das implementações e fornece uma melhor compreensão da forma de funcionamento do trabalho realizado.

A.Funções AE

As funções de análise estrutural (AE) são o conjunto de códigos responsáveis pelo cálculo de esforços solicitantes e deslocamentos apresentados pela estrutura. O conjunto é composto por nove arquivos, sendo oito deles funções baseadas ou extraídas do CALFEM (Austrell *et al.*, 2004). As funções presentes neste conjunto são as funções AE_assem, AE_beam2g, AE_beam2gs, AE_beam2g_Chén, AE_beam2gs_Chén, AE_edc, AE_extract, AE_rigidez e AE_solveq.

A função `AE_assem` é a função responsável por pegar as matrizes de rigidez e vetores de forças locais dos elementos e organizar as informações em um âmbito global. Essa é uma função retirada do CALFEM (Austrell *et al.*, 2004).

As funções `AE_beam2g` e `AE_beam2g_Chen` são funções para criação de matrizes locais de rigidez e vetores locais de força. A função `AE_beam2g` foi extraída do CALFEM (Austrell *et al.*, 2004), enquanto a função `AE_beam2g_Chen` é uma variação da função `AE_beam2g` na qual são consideradas ainda a rigidez das ligações das extremidades do elemento para realização dos cálculos da matriz local e esforços, conforme metodologia descrita no item 3.4 deste documento.

As funções `AE_beam2gs` e `AE_beam2gs_Chen` são funções utilizadas para obtenção de esforços solicitantes nas barras. De forma similar ao caso anterior, a função `AE_beam2gs` foi extraída do CALFEM (Austrell *et al.*, 2004) enquanto a função `AE_beam2gs_Chen` é a função `AE_beam2gs` com modificações para consideração da metodologia apresentada no item 3.4 para ligações semirrígidas.

A função `AE_edc` serve para obtenção dos deslocamentos nas direções vertical e horizontal dos elementos estruturais. Ela foi criada com base na função `beam2crd` do CALFEM (Austrell *et al.*, 2004).

A função `AE_extract` é utilizada para obtenção dos deslocamentos dos elementos estruturais. Diferente da função `AE_edc`, ela não especifica a direção do deslocamento apresentado. Esta função foi extraída do CALFEM (Austrell *et al.*, 2004).

A função `AE_rigidez` é responsável por organizar os resultados emitidos pelo problema local de otimização para cálculos do problema global. Esta recebe os valores de coeficientes de rigidez e calcula os valores de fator de rigidez r_i conforme a equação (19) da seção 3.4, além de organizar as informações atribuindo-as à extremidade apropriada de cada barra.

A função `AE_solveq` resolve o sistema de equações do problema de análise, obtendo as reações dos apoios e deslocamentos dos nós da estrutura. Esta função foi extraída do CALFEM (Austrell *et al.*, 2004).

B.Funções FRP

As nove funções do conjunto de restrições do pórtico (FRP) são utilizadas para definição de parâmetros e esforços resistentes conforme o estabelecido para ELU e ELS segundo a norma NBR 8800 (ABNT, 2008). Compõem este conjunto as funções FRP_DetectarPerfis, FRP_ParametroQ, FRP_ParametroK, FRP_AnaliseEstrutural, FRP_Nrd, FRP_Mrd, FRP_EqLigacoes, FRP_EqDeslocamentos e FRP_EqConstrutivas. As funções FRP foram criadas para serem executadas pelo algoritmo genético durante a etapa de otimização de nível global e utilizados pela função de otimização OE_RestricoesPortico.

Conforme estabelecido no item 4.1.1, as variáveis de projeto da otimização global são organizadas em um vetor com n valores que variam de 1 a 107, sendo n é o número de grupos de elementos a ser otimizado. Cada um dos valores corresponde a um perfil do banco de dados, o catálogo de perfis comerciais fornecido pela Gerdau. Assim, é necessária uma forma de estabelecer a correspondência entre o valor contido no indivíduo do algoritmo genético e os valores presentes no banco de dados. Essa tradução é realizada pela função FRP_DetectarPerfis, que relaciona os indivíduos do algoritmo genético à cada perfil do banco de dados (criado anteriormente pela função Fun_PerfisGerdauSI) e extrai os valores dimensionais das seções necessários para as demais funções FRP.

A função FRP_PartametroQ calcula o fator de redução Q presente na NBR 8800 (ABNT, 2008) conforme o item 3.5.1.1 deste documento.

A função FRP_ParametroK é responsável pelo cálculo do coeficiente de flambagem K segundo a metodologia de Kishi *et al.* (1997) conforme estabelecido no item 5.5.1.2.

A função FRP_AnaliseEstrutural é responsável por utilizar os dados de entrada relativos à análise estrutural em um ciclo iterativo com as funções AE. Assim, toda a análise estrutural é realizada por este trecho do algoritmo, capaz de realizar uma análise estrutural não-linear por método tangente. O código se utiliza do método dos elementos finitos para realizar a análise estrutural e estabelece como critério de parada a variação do esforço normal no primeiro elemento, que deve ser menor que

um valor de tolerância pré-estabelecido. Ao final do ciclo iterativo, o programa FRP_AnaliseEstrutural emite os valores de esforços solicitantes e deslocamentos relativos ao problema verificado, de acordo com a população que está sendo otimizada.

As funções FRP_Nrd e FRP_Mrd são respectivamente responsáveis pelo cálculo dos esforços normais resistentes e momentos fletores resistentes, conforme estabelecido pela norma brasileira NBR 8800 (ABNT, 2008). A metodologia se encontra no item 3.5 deste documento.

As funções FRP_EqEsforços, FRP_EqDeslocamentos e FRP_EqConstrutivas são responsáveis pela criação de parte do grupo de restrições para a otimização global. A FRP_EqEsforços utiliza os dados provenientes das funções FRP_AnaliseEstrutural, FRP_Nrd e FRP_Mrd para verificação das equações (79) e (80) apresentadas no item 3.5.3. A FRP_EqDeslocamentos utiliza as informações criadas pela função FRP_AnaliseEstrutural para verificação dos limites demonstrados na Tabela 3.3, presente no item 3.5.5. A FRP_EqConstrutivas utiliza dimensões fornecidas pela função FRP_DetectarPerfis para verificar os limites dimensionais da seção do pilar contínuo, conforme enunciado no item 4.1.3.

C.Funções FRL

As funções de restrições de ligações (FRL) são funções utilizadas no dimensionamento e análise estrutural de ligações viga-pilar. Fazem parte deste grupo as funções FRL_Soldas e FRL_CalcUS. Ambas são utilizadas pela função de restrição do problema de otimização por algoritmo genético de nível local, a função OE_RestricoesLigacoes.

A função FRL_Soldas é responsável por dimensionar e verificar as soldas da ligação viga-pilar de acordo com os critérios da norma brasileira NBR 8800 (ABNT, 2008). Enquanto isso, a função FRL_CalcUS dimensiona as ligações de chapa de extremidade conforme o estabelecido pela EN 1998-1-8 (CEN, 2011). Ambas etapas foram feitas de maneira separada porque a determinação do momento resistente da

ligação e rigidez dependem também das dimensões da solda, conforme demonstrado no item 3.3 deste documento. Dessa maneira, optou-se por manter ambas as etapas separadas, com dimensionamento de soldas feito inicialmente. A norma NBR 8800 (ABNT, 2008) recomenda a utilização do Eurocode 3 para dimensionamento de ligações que não sejam consideradas como totalmente rígidas ou totalmente flexíveis. Assim, o dimensionamento realizado pelo conjunto de funções está em acorãança com o corpo normativo vigente, embora utilize-se da metodologia europeia para efetuação do dimensionamento.

D.Funções OE

As funções de otimização estrutural (OE) se preocupam com os processos de otimização de níveis local e global, tal como nos ajustes necessários para realização do ciclo iterativo entre elas. Todas são, portanto, funções internas do algoritmo de otimização utilizadas pela função principal de otimização estrutural, a Fun_OtimizarEstrutura, que é responsável pela efetiva realização da otimização bi nível. O grupo OE é o maior grupo de funções de otimização, com 13 membros. Fazem parte desse grupo as funções OE_VariaveisOE, OE_VariaveisFRL, OE_VariaveisDL, OE_SolicitacoesLigacoes, OE_ResultadosParciais, OE_RestricoesLigacoes, OE_RestricoesPortico, OE_ObjetivoLigacoes, OE_ObjetivoPortico, OE_lsubAlterados, OE_dptpOtimos, OE_DimensionamentoLigacoes e OE_ConfigAG.

O algoritmo genético no ambiente MATLAB® exige algumas informações para funcionar de forma devida. É necessário, entre outros dados, uma função de restrições e uma função objetivo, feitas em arquivos separados de extensão “.m”. No algoritmo implementado, a função OE_RestricoesPortico tem todos os critérios apresentados no item 4.1.3 e a função OE_ObjetivoPortico os critérios observados no item 4.1.2. Estas são, portanto, a função de restrição e função objetivo do problema de otimização de nível global. De forma similar, as funções OE_RestricoesLigacoes e OE_ObjetivoLigacoes trazem os critérios presentes nos itens 4.2.3 e 4.2.2 e são, respectivamente, a função de restrição e objetivo da otimização em nível local.

Para cada variável de projeto em um problema de otimização por algoritmo genético, o MATLAB® permite a instituição de valores lb e ub correspondentes aos valores máximo e mínimo que a variável pode alcançar. No problema de otimização local, por exemplo, em que d_p tem nove possíveis valores, pode-se instituir lb e ub como 1 e 9, respectivamente. Dessa maneira, o algoritmo genético não tenta acessar elementos que não existem no banco de dados, como um d_p associado ao número -1 ou 11. O problema local de otimização, tendo em vista a operação bi nível do código, apresenta uma peculiaridade no que diz respeito a esses limites. Em uma determinada iteração é possível que a alteração dos perfis metálicos da estrutura crie combinações impossíveis de existir na consideração do banco de dados completo. Uma diminuição do perfil da viga, por exemplo, poderia fazer com que, caso d_p assumira o maior valor presente no banco de dados, seja impossível respeitar os espaçamentos mínimos entre elementos geométricos da ligação por chapa de extremidade. Dessa forma, foi criada a função OE_lubAlterados, que altera os valores lb e ub do problema local de otimização para excluir combinações incompatíveis com a norma, tornando a otimização mais eficiente.

Há ainda uma série de configurações que podem ser feitas no algoritmo genético para realização da otimização. A função OE_ConfigAG é responsável por criar as configurações de otimização do problema em ambos os níveis.

Outra peculiaridade é o fato de que a otimização por algoritmo genético emite apenas os valores de elementos ótimos, valor das funções de restrição e valor da função objetivo, além de dados de diagnóstico do problema. Assim, no nível local de otimização, embora os valores de $S_{j,ini}$ sejam calculados, eles não podem ser diretamente extraídos do problema local de otimização. Por isso foi criada a função OE_dptpOtimos, que, para os valores ótimos de d_p e t_p encontrados para cada ligação, calcula e exporta os valores de rigidez inicial para posterior uso do nível global de otimização.

O ciclo iterativo de otimização bi nível criado exige uma série de variáveis para armazenamento de informações. De forma correspondente, como o nível local é utilizado múltiplas vezes, otimizando um grupo de ligações de cada vez, uma série de variáveis é indispensável para sua organização. Dessa maneira, as funções OE_VariaveisOE e OE_VariaveisFRL criam variáveis e organizam informações.

Como explicado no item 4.1.3, como as alterações realizadas no nível global de otimização exercem forte influência nos resultados do nível local de otimização, embora as ligações não sejam modificadas no nível global é verificado se elas ainda são capazes de suportar os esforços solicitantes impostos. Com este intuito foram criadas as funções OE_VariaveisDL, OE_SolicitacoesLigacoes e OE_DimensionamentoLigacoes. O procedimento para checar as ligações é feito utilizando lógica parecida com o da otimização local, sendo feito por grupo de ligação. A função OE_VariaveisDL tem mesmo intuito da função OE_VariaveisFRL, criando, no entanto, apenas as variáveis interessantes para o cálculo da resistência das ligações. A função OE_DimensionamentoLigacoes encontra o valor de momento resistente $M_{j,Rd}$ da ligação considerando os a população vigente do algoritmo genético. O processo utilizado é análogo ao visto na função FRL_RestricoesLigacoes para dimensionamento. A função OE_SolicitacoesLigacoes apenas organiza os valores de momentos solicitantes das ligações obtidos no processo de análise estrutural para posterior comparação com os momentos resistentes. Embora essas três funções sejam utilizadas apenas na criação de restrições para o nível global de otimização, elas foram classificadas como OE em vez de FRP por existirem devido à iteração entre os diferentes níveis de otimização, sendo mais próxima em utilidade das demais funções do grupo OE.

Os valores encontrados são utilizados para criar o conjunto de restrições das ligações que, caso violados, ocasionam a falha da população vigente no processo de otimização. Além desta consideração, como dito anteriormente, a alteração dos perfis pode ainda ocasionar o dimensionamento de ligações viga-pilar irregulares, retornando valores negativos de momento resistente $M_{j,Rd}$ e rigidez inicial $S_{j,ini}$. Para resolver essa consideração no nível global são criadas ainda restrições que impedem valores abaixo de zero para ambos.

A função OE_ResultadosParciais é utilizada para imprimir de forma organizada os resultados encontrados ao fim de cada ciclo iterativo do algoritmo no MATLAB®, permitindo que o usuário acompanhe a evolução do processo de otimização.

E. Funções Fun e o programa PP_Otim_Port_SRC_Multi

As funções do tipo Fun são diretamente executadas pelo programa principal e são responsáveis pelo controle das etapas do processo de iteração com o programa: entrada de dados, criação de banco de dados, otimização da estrutura e emissão de resultados. Fazem parte desse grupo as funções Fun_LerPorticoXlsx, Fun_LerLigacaoXlsx, Fun_PerfisGerdauSI, Fun_ClassificarElementos, Fun_OtimizarEstrutura e Fun_ResultadosFinais.

As funções Fun_LerPorticoXlsx e Fun_LerLigacaoXlsx são responsáveis pela interpretação das tabelas de entrada de dados. Após organizar as informações da estrutura em tabelas do EXCEL[®], o usuário deve, no início da iteração com o programa de otimização, indicar os arquivos que serão utilizados. Essas funções retiram das tabelas as informações e organizam-nas em variáveis de programação para posterior utilização.

A função Fun_PerfisGerdauSI cria uma variável de MATLAB[®] do tipo tabela com todas as informações do banco de dados de perfis comerciais da Gerdau com unidades convertidas para o sistema internacional.

A função Fun_ClassificarElementos classifica todos os elementos estruturais como viga ou coluna. A classificação é utilizada para tratamento diferente dos elementos de acordo com suas funções estruturais sempre que necessário.

A função Fun_OtimizarEstrutura é responsável por coordenar os níveis global e local de otimização. É dentro dela ou de funções internas a ela que todas as funções das demais classificações são utilizadas.

A função Fun_ResultadosFinais imprime todos os resultados obtidos do processo de otimização Fun_OtimizarEstrutura de forma organizada. É muito parecida com a função OE_ResultadosParciais, tendo apenas algumas informações adicionais e modificações na organização de dados.

O programa principal PP_Otim_Port_SRC_Multi é responsável pela iteração com o usuário final e organização das funções Fun. É nele também que são criados os bancos de dados para a otimização global.